



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Samuli Aflecht

# Taajuusmuuttajan generaattorikäyttö

## Vacon NXP Grid Converter

Tekniikka ja liikenne  
2014

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Samuli Aflecht
Opinnäytetyön nimi	Taajuusmuuttajan generaattorikäyttö
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	41 + 1 liite
Ohjaaja	Kari Jokinen

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Vaconin verkkovaihtosuuntaajan ja siihen perustuvan sovelluksen Vacon NXP Grid Converterin teoreettista taustaa sekä suunnitella kyseistä tekniikkaa hyödyntävä laitteisto koulutuskäyttöä varten. Sovellus tarjoaa uusia ominaisuuksia erityisesti rinnankytkettyjen generaattorikäyttöjen tehonsäätöön. Tekniikkaa voidaan soveltaa erityisen hyvin hajautetun energiantuotannon ratkaisuissa, joissa energiantuotannon olosuhteet ovat vaihtelevia.

Verkkovaihtosuuntaajan ja yleensäkin taajuusmuuttajan teknistä taustaa selvittäessä täytyy paneutua teoreettisen sähkötekniikan perusteisiin ja vaihtosähkötehon kompleksiseen esitykseen. Tärkeätä on ymmärtää eri suureiden verrannollisuus toisiinsa joiden perusteella kokonaisuus toimii. Olennainen ja tärkeä osa työn teoreettisesta sisällöstä on pätö- ja loistehon siirtäminen ja säätäminen. On hienoa havaita, kuinka nykypäivän sovellukset käyttävät kuitenkin perimmäisinä toimintaperiaatteinaan vanhoja teorioita ja olettamuksia, esimerkiksi taajuusmuuttajan tehon syöttö verkkoon, joka perustuu tehon siirtämiseen häviöttömässä johtimessa. Jännitteiden välisellä vaihe-erolla saadaan pätöteho siirtymään. Samoihin teoreettisiin lähtökohtiin perustuu myös kuormitusjouston periaate.

Laitteiston suunnittelun lähtökohtana käytetään sovellustiimin testilaitteistoa. Alkuperäistä tavoitetta laitteen suunnitteluun ja rakentamiseen muutettiin laajuudeltaan kattamaan laitteiston teoreettinen tarkastelu sekä suunnittelu sähköpiirustukseen. Opinnäytetyöstä saa hyvin käsityksen laitteiston teoriasta sekä toiminnasta ja sähköpiirustukset toimivat ohjeena lopullisessa toteutuksessa.

## ABSTRACT

Author	Samuli Aflecht
Title	Frequency Converter Generator Drive
Year	2014
Language	Finnish
Pages	41 + 1 appendix
Name of Supervisor	Kari Jokinen

---

The purpose of this thesis was to examine Vacon's inverter based application Vacon NXP Grid Converter and its theoretical basis and also to design a training hardware in which this particular technology is applied. The application provides new features particularly for the power control of parallel power sources. The technique can be applied extensively in the distributed generation of electricity in which the conditions of the generation can fluctuate.

When examining an inverter or a frequency converter and their theoretical basis one has to delve into the theory of electrical engineering and complex AC-power. It is crucial to understand the used quantities and how they are proportional to each other, which forms the basis of the whole operation. The essential and important part of the theoretical content of this thesis is the transfer and the control of active and reactive power. It is inspiring to see how today's new innovations and applications are still fundamentally based on old theories and assumptions. For example, the technique that is used in a frequency converter to feed power to the grid. A phase difference between voltages is needed to enable the active power transfer. Drooping is also based on the same theoretical basis.

The basis for the design process was the testing hardware used by the application team. The original objective of the thesis was to design and manufacture a training hardware. The objective was slightly changed to include the theoretical examination and hardware design. This thesis can be used as a guide for theoretical briefing and the electric drawings produced can be used as instructions in the final assembly.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO .....	6
	Työn tarkoitus.....	7
2	YRITYSESITTELY .....	8
3	TAAJUUSMUUTTAJAN RAKENNE.....	10
	3.1 NFE ja AFE.....	10
	3.2 LCL-Suodatin .....	12
4	TAAJUUSMUUTTAJAN GENERAATTORIKÄYTTÖ.....	14
	4.1 Vacon NXP Grid Converter ja Shaft Generator .....	16
	4.2 OPT-D7.....	18
	4.3 AFE-tyypit ja sovellutusalueet.....	19
5	PÄTÖ- JA LOISTEHON SÄÄTÖ .....	22
	5.1 Pätö- ja loistehon syöttö kuristimen läpi (yleisesti).....	22
	5.2 Jännitehäviön kompensointi (Open-Loop) .....	25
	5.3 Standard AFE mode (Verkkokäyttö PTI) .....	28
	5.4 Island mode (Saarekekäyttö PTO).....	29
	5.5 Microgrid Mode (Saarekekäyttö PTO ja Verkkokäyttö PTO).....	29
	5.5.1 Toimintaperiaate: Droop Speed Control (Muuttuva taajuus).....	30
	5.5.2 Toimintaperiaate: Isochronous Speed Control (Vakio taajuus)...	34
6	LAITTEEN KOKOONPANO.....	35
7	LAITTEEN TOIMINTA .....	37
	7.1 Standard AFE mode.....	38
	7.2 Island mode.....	38
	7.3 Microgrid mode .....	38
8	LAITTEEN SÄHKÖISET KYTKENNÄT.....	39
9	YHTEENVETO .....	40
	LÄHTEET.....	41
	LIITTEET	

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio .....	10
<b>Kuva 2.</b> NFE (non-regenerative front-end) .....	11
<b>Kuva 3.</b> AFE (active front-end) .....	12
<b>Kuva 4.</b> Generaattorikäytön pääpiirikaavio.....	15
<b>Kuva 5.</b> 4Q-käyttö eli nelikvadranttikäyttö .....	16
<b>Kuva 6.</b> Kokoonpano maasähkö- ja akseligenaattorisovellukselle .....	17
<b>Kuva 7.</b> Vaihtosähköteho häviöttömässä johtimessa .....	22
<b>Kuva 8.</b> Pätötehon säätö yleisesti .....	24
<b>Kuva 9.</b> Loistehon säätö yleisesti .....	25
<b>Kuva 10.</b> Jännitehäviön kompensointi .....	25
<b>Kuva 11.</b> Jännitehäviön kompensointilaskelma .....	27
<b>Kuva 12.</b> Kuormitusjousto, periaatekuva .....	31
<b>Kuva 13.</b> Frequency drooping eli taajuuden kuormitusjousto .....	32
<b>Kuva 14.</b> Voltage drooping eli jännitteen kuormitusjousto.....	33
<b>Kuva 15.</b> Laitteen kokoonpanokaavio .....	35

## 1 JOHDANTO

Sähkömoottori ja generaattori ovat pyöriviä sähkökoneita, joita käytetään mekaanisen energian ja sähköenergian tuottamiseen. Sähkömoottorin napoihin syötetään sähköenergiaa ja sen akselilta saadaan tietyllä hyötysuhteella mekaanista energiaa. Generaattorin akselia pyöritetään voimakoneen mekaanisella energialla ja sen navoista saadaan tietyllä hyötysuhteella sähköenergiaa. On arvioitu, että maailmanlaajuisesti lähes kaikki sähköenergia tuotetaan generaattoreilla ja kaksi kolmasosaa kaikesta tuotetusta sähköenergiasta kulutetaan sähkömoottoreissa. /6/

Sähkön hinnan nousu ja ympäristömääräysten tiukentuminen ympäri maailmaa ovat kasvattaneet kiinnostusta energian säästämiseen ja uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämiseen sähköntuotannossa. Muun muassa Euroopan Unioni on asettanut tavoitteen lisätä vihreän sähkön tuotantoa viidenneksellä vuoteen 2020 mennessä ja puolittaa hiilipäästöt vuoteen 2050 mennessä. /2/

Taajuusmuuttajan käyttö tarjoaa energia- ja kustannustehokkaan ratkaisun säädetäviin sähkökäyttöihin tarjoamalla säästöä kulutetun energian määrässä sekä prosessin tehokkuuden parantumisessa. Tämä johtaa myös sähköverkon pienempään kuormitukseen ja sitä kautta vähentää hiilidioksidipäästöjä. Taajuusmuuttajan muita etuja ovat mm. säästöt moottorilähdön ja kaapeleiden sähköteknisessä mitoituksessa pienemmän käynnistysvirran ansiosta. Laitteiston mekaaninen huoltoväli pitenee, koska mekaaniset rasitukset pienenevät virran pienentyessä. Automaation liittäminen järjestelmään helpottuu monipuolisten liitántärajapintojen ansiosta.

Taajuusmuuttajan hieman erikoisempi käyttökohde on sen käyttö sähköenergian tuotannossa liitälaitteena sähköä tuottavan generaattorin ja siirron kohteena olevan sähköverkon välissä. Taajuusmuuttaja muuttaa generaattorin tuottaman sähkön käyttöön sopivaksi ja syöttää sen edelleen verkkoon. Taajuusmuuttajan käyttö mahdollistaa tasaisen nimellisjännitteen ja taajuuden vaikka generaattorin tuottamat jännite ja taajuus poikkeaisivat nimellisistä arvoista.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan taajuusmuuttajaa generaattorikäytössä. Työ tehdään Vacon Oyj:lle. Yrityksellä on valmiita tuotteita generaattorikäyttöihin ja työn tavoitteena on pyrkiä havainnollistamaan kyseisten käyttöjen käyttöönottoprosessia sekä suunnittelemaan ja mahdollisesti myös toteuttamaan taajuusmuuttajan generaattorikäyttöä simuloiva laitteisto koulutuskäyttöä varten.

### **Työn tarkoitus**

Tässä opinnäytetyössä keskitytään sähköntuotantoon generaattorilla ja taajuusmuuttajalla sekä tutkitaan taajuusmuuttajan toimintaa verkon erilaisissa kuormitustilanteissa ja verkkotilojen reaaliaikaisissa muutoksissa. Työ tehdään yhteistyössä Vaconin koulutusosaston, Vacon Training Centerin kanssa. Tavoitteena on suunnitella demolaite, jolla voidaan simuloida Vacon NXP Grid Converter-tuotteen käyttöä ja käyttöönottoa. Demolaite sisältäisi oikosulkumoottorin voimakoneena ja kestopagneettikoneen generaattorina. Sekä oikosulkumoottoria että kestopagneettikoneita ohjataan taajuusmuuttajilla. Ajatuksena on myös kytkeä koulutuslaboratorion taajuusmuuttajia ja sähkömoottoreita kuormaksi generaattoreille simuloimaan teollisuudessa yleisesti esiintyviä kuormitustilanteita.

Tarve työlle on olemassa, koska suurin osa käyttöönotoista ja käyttöönottajista keskittyy moottorien ohjauksiin taajuusmuuttajilla yleensä jäykän verkon jatkeena. Suunniteltavan laitteiston avulla voitaisiin merkittävästi lisätä käyttöönottajien ammattitaitoa käsittämään myös taajuusmuuttajan generaattorikäytön perusteet.

## 2 YRITYSESITTELY

Vacon Oyj (ent. Vaasa Control Oy) on vuonna 1993 Vaasassa perustettu taajuusmuuttajatekniikkaan erikoistunut yritys. Sen perustivat 13 avainhenkilöä, jotka irtaantuivat ABB Drives-yksiköstä. Kaksi vuotta myöhemmin lanseerattiin ensimmäiset CX-tuoteryhmän taajuusmuuttajat. Samana vuonna avattiin tehdas Vaasan Runsoriin.

Vuonna 2000 lanseerattiin ensimmäiset NX-tuoteryhmän taajuusmuuttajat ja yritys listautui Helsingin pörssiin. Myös yrityksen nimi muutettiin Vacon Oyj:ksi.

Vuonna 2005 aloitettiin taajuusmuuttajien tuotanto Kiinassa ja kaksi vuotta myöhemmin lanseerattiin ensimmäisen kolmannen sukupolven VACON 10 -tuoteryhmän taajuusmuuttaja.

Vuonna 2010 yhtiö aloitti toiminnan aurinkoenergia-alalla ja osti pienen espanjalaisen aurinkoinvertterien suunnitteluun erikoistuneen yrityksen. Samana vuonna kehitettiin VACON SOLAR 8000 –invertterit ja Multimaster-ohjelmisto.

Vuonna 2011 Vacon lanseerasi kolme uutta taajuusmuuttajaa SPS/IPC/DRIVES 2011 –messuilla Saksan Nürnbergissä. Uusi VACON 10–malli sekä VACON 20 ja VACON 20 Cold Plate suunniteltiin erityisesti kone- ja laitevalmistajien erilaisiin tarpeisiin ympäri maailmaa.

Vuonna 2012 Vacon esitteli kolme uutta tuotetta VACON Drives Conference 2012 -tapahtumassa, uuden yleiskäyttöisten taajuusmuuttajien edelläkävijän VACON 100 ja kaksi hajautettuihin käyttöihin kuuluvaa IP66/UL Type 4X –taajuusmuuttajaa. /10/

Nykyään Vaconilla on tuotantoa ja tuotekehitystä Euroopassa, Aasiassa, Pohjois-Amerikassa sekä myyntiyhtiöt 30 maassa. Lisäksi Vaconilla on myynti- ja huoltoedustusta 90 maassa. Vuonna 2013 Vaconin liikevaihto oli 403 miljoonaa euroa ja yhtiön palveluksessa oli maailmanlaajuisesti noin 1600 henkilöä. Vaconin markkinaosuuden on arvioitu olevan noin 5 % maailman taajuusmuuttajamarkki-



noista. Vacon sijoittuu liikevaihdoltaan maailman seitsemän suurimman taajuusmuuttajavalmistajan joukkoon. /11/

Vacon valmistaa taajuusmuuttajia pääasiassa pienjännitteelle. Vuonna 2013 tehtiin päätös tuotevalikoiman laajentamisesta myös keskijännitealueelle. Tuotevalikoima kattaa tällä hetkellä pienjännitekäytöt 0,25 kilowatista aina 5 megawattiin saakka.

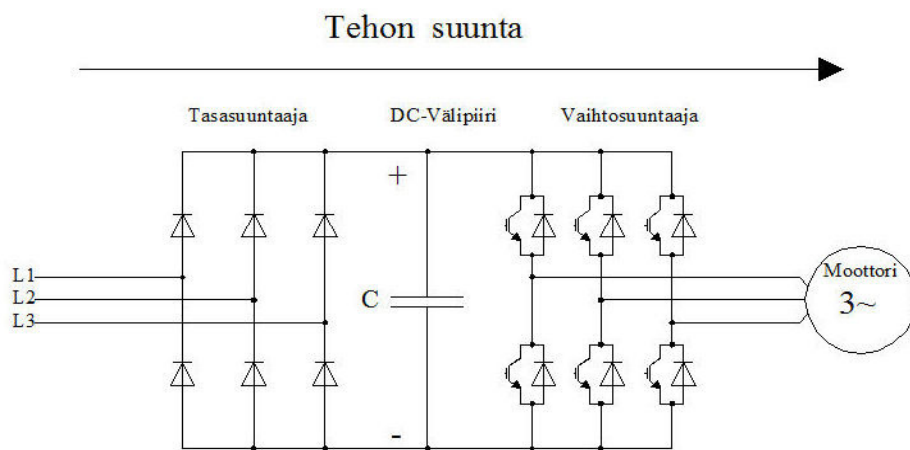
Yrityksellä on myös vahva ote vihreän teknologian ratkaisuihin ja vuonna 2013 Vaconin taajuusmuuttajien avulla säästettiin arviolta 55 TWh energiaa, joka vastaa arviolta kymmenen 700 MW ydinreaktorin tuotantokapasiteettia. Lisäksi Vaconin tuotteilla tuotettiin energiaa uusiutuvista energialähteistä 22 TWh. /10/

### 3 TAAJUUSMUUTTAJAN RAKENNE

Yleisin nykyisin käytössä oleva taajuusmuuttaja (**Kuva 1.**) on kolmivaiheinen kaksitasoinen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Se koostuu tasasuuntaajasta, DC-välipiiristä, vaihtosuuntaajasta sekä ohjaus- ja säätöpiiristä. Tasasuuntaajassa verkon sinimuotoinen vaihtojännite muutetaan tasajännitteeksi. Tätä lähimpänä verkkoa olevaa yksikköä kutsutaan myös etuasteeksi (eng. Front End).

Vaihtosuuntaajassa välipiirin tasajännitteestä muodostetaan pulssin leveysmodulaatiota käyttäen moottorille halutun taajuista ja perusaalloltaan halutun amplitudin omaavaa vaihtojännitettä.

Vaihtosuuntaajan ja tasasuuntaajan välissä on DC-välipiiri, jonka tehtävänä on tasoittaa tasasuuntaajalta tulevaa epätasaista tasajännitettä ja toimia tasoittavana energiavarastona moottorin ja verkon välillä. Ohjaus- ja säätöpiirin tehtävänä on huolehtia vaihtosuuntaajan IGBT-transistoreiden ohjauksesta ja toimia koko taajuusmuuttajan älynä.

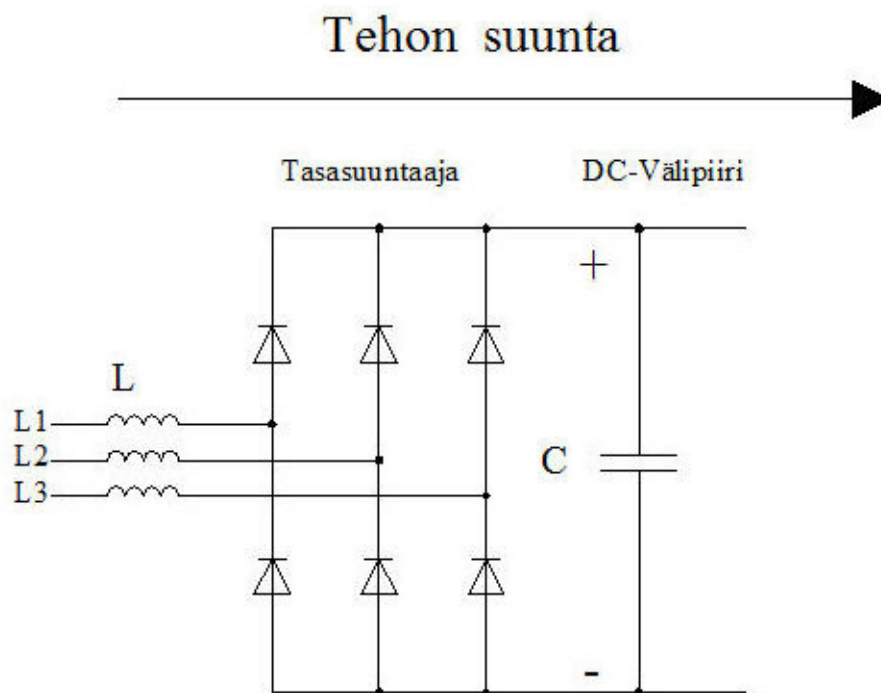


**Kuva 1.** Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio

#### 3.1 NFE ja AFE

Yleisin moottoria ohjaava jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja sisältää 6-pulssisen diodisillan tasasuuntaajayksikkönä ts. etuasteena, joka mahdollistaa sähkötehon siirtymisen vain yhteen suuntaan, verkosta moottoriin. Tällöin moot-

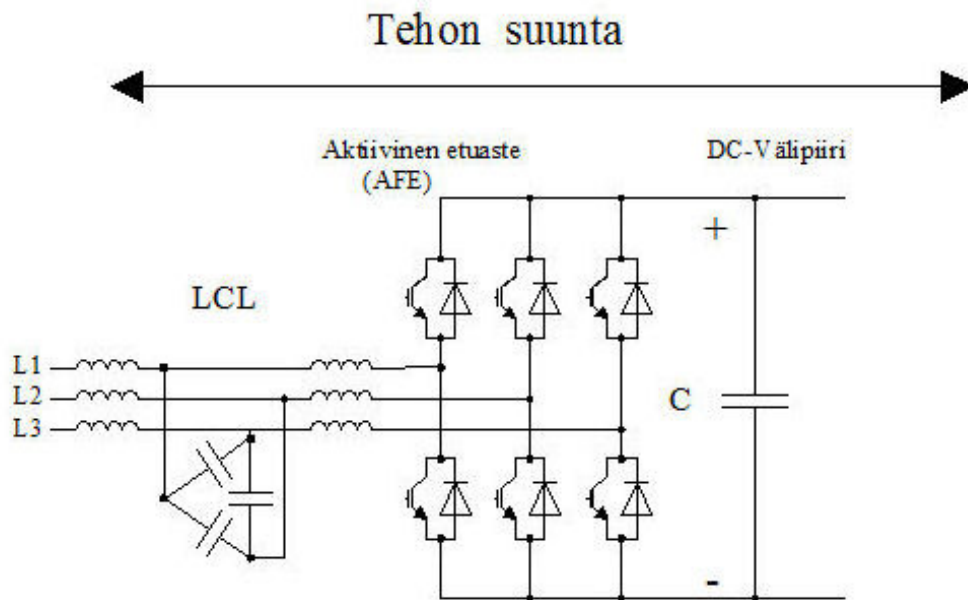
torin mahdollisessa jarrutustilanteessa syntyvä jarrutusenergia joudutaan kuluttamaan välipiirin resistanssissa jarrukatkojan avulla hukkalämmöksi. Diodisilta ei siis pysty vaihtosuuntaamaan energiaa takaisin syöttävään sähköverkkoon. Vacon käyttää tällaisesta etuasteesta nimitystä ei-regeneratiivinen syöttöyksikkö, non-regenerative front-end tai lyhennettä NFE (**Kuva 2.**). Kuristinta käytetään syötössä, jotta laitteen verkkoon aiheuttama virran kokonaissärö (engl. Total Harmonic Distortion), THDi saadaan hyväksyttävälle noin 30 %:n tasolle. /7/



**Kuva 2.** NFE (non-regenerative front-end) /7/

Diodisillan tilalla on mahdollista käyttää myös aktiivisia IGBT-transistoreja (Insulated Gate Bipolar Transistor) ja niiden rinnalle vastarinnankytkettyjä nolladiodeja. Tämä tekniikka mahdollistaa tehon liikkumisen kaksisuuntaisesti jolloin em. jarrutusenergia voidaan vaihtosuunnata takaisin syöttävään verkkoon. Verkkoliitännässä syöttöpuolella käytetään ulkoista LCL-suodatinta, jota tarvitaan itse toiminnan mahdollistamiseen verkon sinimuotoisen jännitteen ja taajuusmuuttajan pulssimaisen jännitteen välillä. Suodattimen avulla laitteen aiheuttama THDi saadaan pieneksi eli virta on lähes sinimuotoista. Muita etuja ovat mahdollisuus te-

hokertoimen säätöön ja loistehon kompensointiin. Vacon käyttää kyseisestä etuas-  
teesta nimitystä aktiivinen etuaste, Active Front-End tai lyhennettä AFE. /7/



**Kuva 3.** AFE (active front-end) /7/

### 3.2 LCL-suodatin

LCL-suodatin on passiivinen suodatin, joka muodostuu kahdesta yhtä suuresta sarjaan kytketystä kelasta ja niiden väliin rinnalle kytketystä kondensaattorista. Kela vastustaa virran muutosta sekä muodostaa suuren impedanssin harmonisille virroille ja tasoittaa näin virtaa. Kondensaattori puolestaan varaa energiaa sähkökenttään ja tätä ominaisuutta käytetään tasoittamaan jännitettä. Suodattimen rakenne perustuu LC-suodattimeen, jonka toimintaa on tehostettu lisäämällä siihen yksi ylimääräinen kela. LCL-suodattimen mitoitukseen käytetään yleisimmin resonanssitaajuuteen perustuvaa menetelmää, jossa ensin asetetaan haluttu resonanssitaajuus, jonka perusteella lasketaan komponenttiarvot. LCL-suodattimessa suodatus on yhtä tehokasta, riippumatta siitä kumpaan suuntaan tehoa siirretään. Vaihtosuuntaustilanteessa eli tehon siirtyessä suuntaajasta verkkoon LCL-suodatin rajoittaa virran kokonaissäröä ja THDi voi olla jopa alle 5 %. Lisäksi

AFE tarvitsee LCL-suodatinta nostaakseen välipiirin jännitettä vaihtosuuntaustilanteessa. Siirrettäessä tehoa verkosta suuntaajaan, LCL-suodatin toimii kuristimena ennen taajuusmuuttajan IGBT-transistoreita. /4/

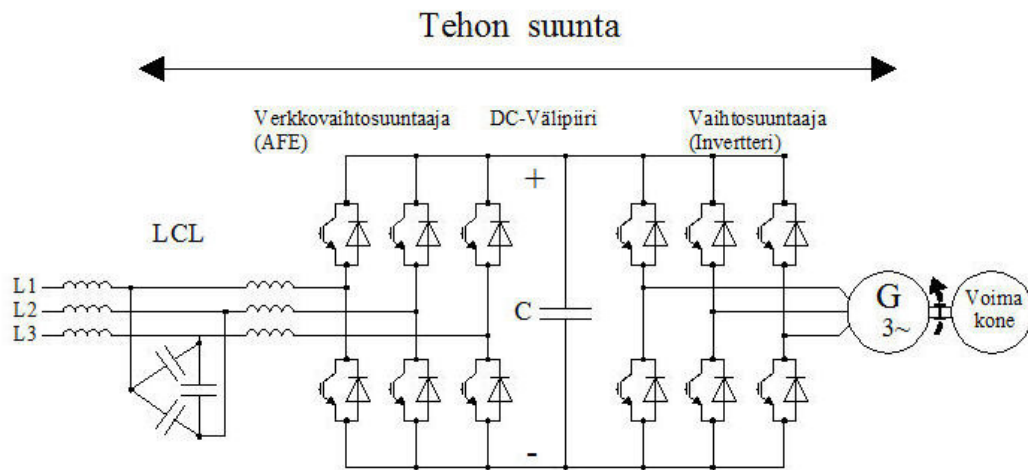
## 4 TAAJUUSMUUTTAJAN GENERAATTORIKÄYTTÖ

Perinteisesti on totuttu käyttämään taajuusmuuttajaa sähkömoottorin ohjaukseen ja säätöön, jolloin tehon suunta on syöttävästä verkosta moottoriin päin. Generaattorikäytössä taajuusmuuttajan tehtävä on generaattorin tuottaman sähkötehon siirtäminen sähköverkkoon. Taajuusmuuttajan avulla generaattori voi toimia eri taajuudella kuin verkko, mikä ei olisi mahdollista generaattorin ollessa kytkettynä suoraan verkkoon. Taajuusmuuttajan käyttö mahdollistaa generaattorin pyörimisen hyvällä hyötysuhteella vaihtelevalla pyörimisnopeudella. Taajuusmuuttaja muokkaa generaattorin taajuuden verkon taajuutta vastaavaksi. /13/

Taajuusmuuttajia voidaan käyttää monissa erilaisissa generaattorikäytöissä. Käyttöjä on yhden generaattorin ja yhden taajuusmuuttajan käytöistä aina monimutkaiseen monigeneraattorikäyttöihin, joissa verkon kuormat on jaettu tarkasti taajuusmuuttajien kesken ja laitteet vaihtavat tietoja keskenään.

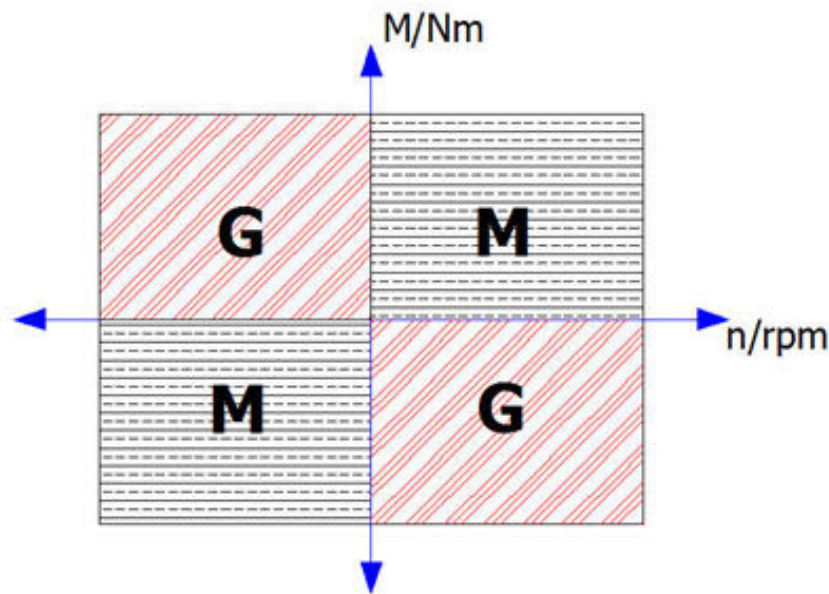
Yksi keskeinen sovellus taajuusmuuttajan generaattorikäytölle on mikroverkko (engl. microgrid). Mikroverkon muodostavat sähköntuotanto, siirtojärjestelmä ja kuorma. Se voi koostua myös yhdistetystä sähkön- ja lämmöntuotannosta CHP:stä (engl. Combined Heat and Power). Mikroverkko on pienimuotoinen ja pien- tai keskijännitteellä toimiva verkko, joka tuottaa sähköä ja/tai lämpöä kuormana olevalle pienelle yhteisölle, kuten aluerakennuskohteelle, teollisuusalueelle, esikaupunkialueelle tai julkisyhteisölle, kuten yliopistolle tai koululle. Mikroverkko käyttää yleensä uusiutuvia ja perinteisistä energianlähteistä poikkeavia saasteetomia energiamuotoja mikrotuotantolaitoksissaan (engl. microsource). Mikrotuotantolaitokset sijaitsevat kuormituksen läheisyydessä, mikä mahdollistaa mitättömän pienet siirtohäviöt lämmön ja sähkön siirtämisessä jännitteen ja taajuuden laadun pysyessä riittävän hyvällä tasolla. Mikroverkko voi toimia joko itsenäisenä verkkona tai se voi olla myös osittain tai kokonaan kytkettynä valtakunnan verkkoon. Taajuusmuuttajan tehtävänä mikroverkossa on toimia sähköntuotannossa generaattorin ja verkon välissä sekä valvoa ja ohjata verkon tehotasapainoa. Se huolehtii myös reaaliaikaisesti tarvittavista tilan vaihdoista itsenäisen tilan ja verkkokytetyn tilan välillä. /2, 1-6/

Ohessa on periaatekuva (**Kuva 4.**) generaattorin kytkemisestä verkkoon taajuusmuuttajan avulla. Taajuusmuuttajan molemmat suuntaajat ovat aktiivisia eli ne on toteutettu IGBT-transistoreilla.



**Kuva 4.** Generaattorikäytön pääpiirikaavio

Taajuusmuuttajan avulla momentin suuntaa voidaan muuttaa pyörimissuunnasta riippumatta. Kulmanopeuden ja pyörimisnopeuden välillä on yhteys ( $\omega = 2 \pi n$ ) ja akseliteho on kulmanopeuden ja momentin tulo ( $P = \omega M$ ), joten se voi saada sekä positiivisia että negatiivisia arvoja. Kuvassa 5 on korostettu punaisella värillä ns. neljännekset, joissa kone toimii generaattorina (G) eli akseliteho saa negatiivisia arvoja ja sen suunta on koneesta verkkoon päin. Mustalla korostetut neljännekset kuvaavat koneen toimintaa moottorina (M) eli akseliteho saa positiivisia arvoja ja tehon suunta on verkosta moottoriin päin. Kone voi siis toimia molempiin pyörimissuuntiin sekä generaattorina että moottorina. Käyttöä nimitetään neljän neljänneksen käytöksi eli nelikvadranttikäytöksi (4Q-käyttö). /13/



**Kuva 5.** 4Q-käyttö eli nelikvadranttikäyttö

#### 4.1 Vacon NXP Grid Converter ja Shaft Generator

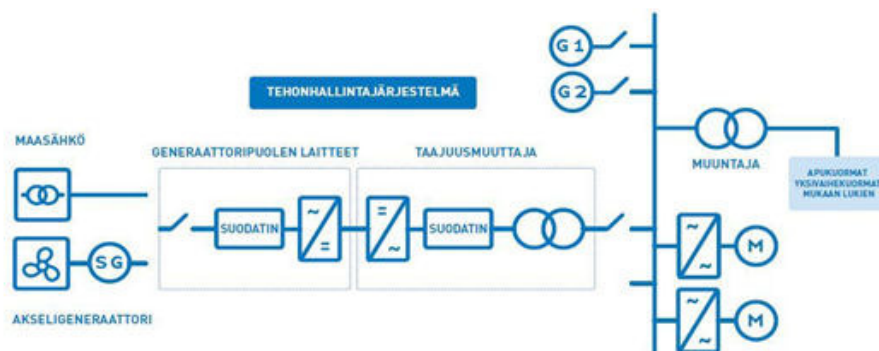
Energiatohokkaan suunnittelun indeksi EEDI (Energy Efficiency Index) on merenkulkualan kansainvälisen organisaation IMO:n (International Maritime Organisation) kehittämä indeksi, jonka päämääränä on parantaa uusien laivojen energiatehokkuutta. Tavoitteena on, että uusien laivojen energiatehokkuutta parannetaan 20 % vuonna 2020 ja 30 % vuonna 2030. Tämän lisäksi IMO on kehittänyt kaikille laivoille tarkoitetun energiatehokkuuden hallintasuunnitelman SEEMP:n (Ship Energy Efficiency Management Plan), jolla myös vanhemman laivakaluston energiatehokkuutta pyritään parantamaan. /9/

Vacon NXP Grid Converterin ensimmäinen julkaisu suunnattiin laiva-/varustamokäyttöön lokakuussa 2013. Sekä Vacon NXP Grid Converter application (ARFIF03) että Vacon Generator application (ARFIF30) luovat uusilla ominaisuuksilla lisäarvoa jo aiemmin julkaistuille Vacon NXP- sarjan taajuusmuuttajille. Generator application on yhteensopiva oikosulku-, kestopagneetti- ja tahtikoneiden kanssa ja sen tehtävä on tuottaa vakio tasajännite Grid Converterille.



Vacon NXP Grid Converter -maastasyöttöratkaisu on suunniteltu vähentämään laivan päästöjä satamassa sekä sovittamaan paikallinen sähkö laivaan sopivaksi. Maasähkölaitantä sisältää yleensä erotusmuuntajan sekä tasasuuntaajayksikön. Tasasuuntaajayksiköksi valitaan sallitun THDi:n mukaan joko 6- tai 12-pulssinen (NFE) tai aktiivinen tasasuuntaus (AFE), jota kutsutaan myös ns. low harmonic-ratkaisuksi. Satamassa ollessa laivan syöttö tehdään Grid Converterilla, joka sisältää vaihtosuuntaajan, suodattimen ja liityntäosan. Alus kytketään kaapeleilla sataman sähköverkkoon ja paikallisen verkon jännite ja taajuus sovitetaan laivan sähköverkon käyttöön. Näin laivan dieselkäyttöiset päämoottori ja apugeneraattorit voidaan sammuttaa ja ehkäistä tarpeettomat hiilipäästöt ja melusaaste sekä mahdollistaa tarvittaessa kunnossapitotoimet. /9/

Vacon NXP Grid Converter -akseligeneraattoriratkaisu on tarkoitettu käytettäväksi laivan seilattaessa merellä. Se sisältää sekä generaattoripuolen että laivaverkko-puolen laitteistot. Generaattoria ohjataan joko pienijännitteisellä invertterillä (INU) tai aktiivisella syöttöyksiköllä (AFE). Akseligeneraattorijärjestelmä asennetaan laivan potkurien ja päämoottorin voimansiirtoakselille ja se mahdollistaa säädetyn ja optimoidun nopeuden laivalle, vaikuttamatta laivan sähköverkon jännitteeseen ja taajuuteen. Nimellisa nopeudella seilattaessa laitteisto voidaan yleensä myös ohittaa, jolloin akseligeneraattori syöttää suoraan laivan sähköverkkoa. Järjestelmä parantaa laivan tehokkuutta ja apugeneraattoreiden käyttöä voidaan merkittävästi vähentää tai niiden käyttö voidaan keskeyttää jopa kokonaan laivan seilattaessa. /9/



**Kuva 6.** Kokoonpano maasähk- ja akseligeneraattorisovellukselle /9/

Akseligeneraattorista voidaan ottaa tehoa laivan sähköverkkoon (PTO, Power Take-Off) tai potkuria voidaan ajaa myös sähköisesti käyttämällä sähkökonetta moottorina (PTI, Power Take-In). Tällöin apugeneraattorit tuottavat koneen tarvitseman sähköä. Tämä ominaisuus mahdollistaa laivan etenemisen vaikka päämoottori olisi epäkunnossa tai pois käytöstä. Lisäksi toimintoa voidaan käyttää esim. satama-alueella hitaalla nopeudella liikuttaessa jolloin päämoottori voidaan sammuttaa ja vähentää näin satama-alueen hiilipäästö- ja melukuormitusta. /9/

Laivakäytössä Grid Converterin ohjaus ja säätö tapahtuvat yleensä I/O:n välityksellä. I/O:n yksinkertaisempi rakenne verrattuna esim. kenttäväylään mahdollistaa helpommat vianhaku- ja korjaustoimet. Tehonhallintajärjestelmä (engl. Power Management System) ohjaa laivan sähköverkon taajuusmuuttajia ja muita laitteita sekä huolehtii tehotasapainosta. Tehonhallintajärjestelmänä voi olla esimerkiksi ohjelmoitava logiikka.

## **4.2 OPT-D7**

OPT-D7 on Vacon NXP taajuusmuuttajiin tarkoitettu jännitteenmittauskortti. Se on tarkoitettu taajuuden, jännitteen ja jännitteen vaihesiirtokulman mittaamiseen. Sen avulla taajuusmuuttaja voi käynnissä ollessaan vertailla mitattuja arvoja omiin vastaaviin arvoihinsa. Ominaisuutta voi käyttää mm. taajuusmuuttajan verkkoon tahdistamisessa.

Grid Converter-sovellus käyttää kortin ominaisuuksia esim. laivan saapuessa satamaan ja mahdollistaa katkottoman vaihdon, kun laivan sähköverkon syöttö vaihdetaan omalta akseligeneraattorilta sataman sähköverkkoon. Kortti mahdollistaa myös verkon taajuuden valvomisen Grid Converterin käynnistystilanteessa niin, että käynnistys- ja liityntähetkellä verkkoon siirtyvä (tai verkosta otettava) teho on nolla (engl. zero power ). Jos taajuutta ei valvota ja verkon taajuus ja taajuusmuuttajan taajuusohje poikkeavat toisistaan, laite voi alkaa heti toimia generaattorina tai syöttää verkkoon täyden tehon. /8/

### 4.3 AFE-tyypit ja sovellutusalueet

Vacon käyttää Grid Converterin yhteydessä tehon suunnan ilmaisuun termejä PTO (Power Take-Out) ja PTI (Power Take-In). PTO tarkoittaa tehon ottamista sähkökoneelta aluksen sähköverkkoon eli konetta käytetään generaattorina. PTI tarkoittaa tehon siirtymistä verkosta sähkökoneelle eli se toimii moottorina ja potkuria ajetaan sähköisesti. PTI boosting on lisätehon antamista käyttövoimaan, jolloin käynnissä olevaa sähkökonetta käytetään moottorina ja se lisää päämoottorin käyttövoimaa. PTI from zero speed tarkoittaa, että sähkökone käynnistetään moottorina ja se yksin tuottaa käyttövoiman ja ottaa tarvittavan tehon aluksen sähköverkon muista tehonlähteistä. Tällä periaatteella toimivat myös PTI take me harbour ja PTI low power manoeuvring. PTI take me harbour tarkoittaa toimintaa, kun laivan päämoottori on epäkunnossa ja pelkän sähkökoneen avulla laivan eteneminen satamaan on turvattu. PTI low power manoeuvring tarkoittaa pienitehoista etenemistä, jolloin sähkökonetta käytetään moottorina ja kytkimen avulla keulapotkurin nopeus on pienempi kuin päämoottorin miniminopeus.

Grid Converter-sovellusta käytetään luomaan vaihtosähköverkkoja joiden rinnalle on mahdollista kytkeä myös muita tehonlähteitä. Grid Converter-sovelluksessa on kolme erilaista toimintatilaa eli moodia, jotka kaikki pystyvät tekniikkansa puolesta kaksisuuntaiseen tehon siirtoon: Standard AFE-moodi, Island-moodi ja Micro Grid-moodi.

Standard AFE-moodi (vrt. verkkokäyttö) ei pysty luomaan tyhjää verkkoa vaan se pitää kytkeä olemassa olevaan verkkoon. Tässä moodissa välipiirin tasajännite pidetään vakiona ja tehon suunta on DC:stä AC:hen eli välipiiristä joko sähkökoneelle tai verkkoon. Sitä voidaan käyttää rinnakkain muiden AFE-laitteiden kanssa (parallel AFE), jolloin kuormituksen säätö tehdään tasajännitteen kuormitusjoustolla (engl. DC-Drooping). Moottorikuorma laskee ja generaattorikuorma nostaa hieman tasajännitettä. Grid Converterissä tätä moodia käytetään yleensä PTI:ssä. Esimerkiksi tilanne, jossa laiva on satamassa kytketty kaapeleilla sataman sähköverkkoon tai laivan ollessa merellä halutaan antaa sähköistä lisätehoa

laivan päämoottorille tai poikkeustilanteessa edetään ainoastaan sähköisesti ajamalla konetta moottorina. /8/

Island-moodissa (vrt. saarekekäyttö) laite luo pysyvän eli staattisen verkon halutulla jännitteellä ja taajuudella. Rinnalle ei voida kytkeä muita tehonlähteitä, koska taajuusmuuttaja ei tasapainota pätö- tai loistehokuormitusta muiden tehonlähteiden kesken. LCL-suodatin tarvitaan aina tätä moodia käytettäessä. Muuntaja tarvitaan myös, koska taajuusmuuttaja ei pysty luomaan nollaa. LCL-suodattimen ja muuntajan aiheuttamat jännitehäviöt tulee ottaa huomioon ja kompensoida jänniteohjetta niin, että haluttu vaihtojännite laitteen lähdössä saavutetaan. Esimerkkinä Island -moodille voidaan käyttää yhtä verkon osaa, joka on kytketty irti jäykästä sähköverkosta, esimerkiksi vikatilanteen tai huoltotöiden takia. Tämä itsenäinen verkon osa saa tällöin syöttönsä yhdestä jäykän verkon rinnalla olevasta vaihtoehtoisesta energianlähteestä, kuten jo aiemmin mainitusta mikrotuotantolaitoksesta. Esimerkkinä voi myös käyttää alusta, joka on satamassa ollessaan kytkettynä jäykkään verkkoon. Aluksen lähtiessä merelle irtoaa se jäykästä verkosta ja laivan päämoottoriin kytketty akseligeneraattori yhdessä taajuusmuuttajan kanssa tuottaa ainoana tehonlähteenä sähkön laivan tarpeisiin ja huolehtii laivan sähköverkon tehotasapainosta. Käyttötapaa nimitetään myös offshore-käytöksi. /8/

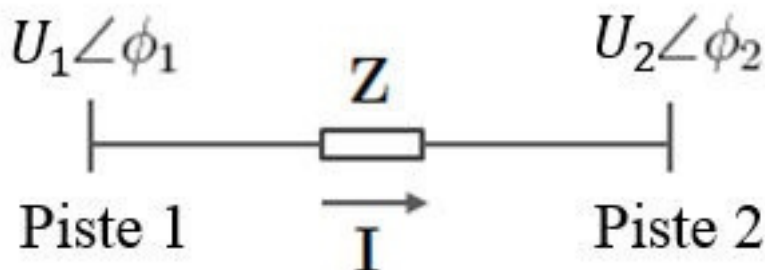
Micro Grid-moodissa laite voidaan kytkeä ja tahdistaa olemassa olevaan verkkoon tai verkon puuttuessa voidaan myös luoda verkko halutulla jännitteellä ja taajuudella. Erona Island-moodiin verkkoon pystytään kytkemään useampia tehonlähteitä rinnakkain sekä taajuus ja jännite voivat vaihdella riippuen kuormituksesta. Pätö- ja loistehokuormien tasapainottaminen useampien tehonlähteiden kesken tapahtuu kuormitusjouston (engl. drooping) avulla, jonka perusteella tehonhallintajärjestelmä säättää pätö- ja loistehoa. Jännitteen kuormitusjoustolla tasoitetaan loistehoa ja taajuuden kuormitusjoustolla tasoitetaan pätötehoa. Esimerkkinä voi myös tässä käyttää alusta, joka on satamassa ollessaan kytkettynä jäykkään verkkoon. Aluksen lähtiessä merelle irtoaa se jäykästä verkosta ja laivan apugeneraattorit ja päämoottoriin kytketty akseligeneraattori yhdessä taajuusmuuttajan kanssa tuottavat sähkön laivan tarpeisiin ja huolehtivat laivan sähköverkon tehotasapainosta. Käyttötapaa nimitetään myös offshore-käytöksi. Micro Grid-moodin yhtey-

dessä on hyvä mainita sen kaksi toimintaperiaatetta: Droop Speed Control ja Isochronous Speed Control, joita selvitetään kohdissa 5.5.1 ja 5.5.2. /8/

## 5 PÄTÖ- JA LOISTEHON SÄÄTÖ

### 5.1 Pätö- ja loistehon syöttö kuristimen läpi (yleisesti)

Tehon syöttö taajuusmuuttajasta verkkoon tai päinvastoin perustuu päto- ja loistehon syöttöön häviöttömässä johtimessa kahden pisteen 1 ja 2 välillä (**Kuva 7.**)



**Kuva 7.** Vaihtosähköteho häviöttömässä johtimessa /1/

$$\bar{U}_1 = U_1 e^{-j\phi_1} = \text{Jännite ja vaihesiirtokulma pisteessä 1}$$

$$\bar{U}_2 = U_2 e^{-j\phi_2} = \text{Jännite ja vaihesiirtokulma pisteessä 2}$$

$$\bar{Z} = \text{Johtimen kompleksinen impedanssi}$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_2 - \bar{U}_1}{\bar{Z}} = \text{virta osoitinmuodossa} \quad (1)$$

Kompleksinen vaihtosähköteho, joka lähetetään vastaanottavaan pisteeseen 2, voidaan esittää:

$$\bar{S} = \bar{U}_2 * \bar{I}^* \quad (2)$$

Yksinkertaisessa mallissa jätetään huomioimatta johdon kapasitanssi ja resistanssi eli esitetään johdon impedanssi puhtaasti induktiivisena eli  $Z = j\omega L = jX$  ja ylläoleva yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\bar{S} = \bar{U}_2 * \left[ \frac{\bar{U}_1 - \bar{U}_2}{jX} \right]^* \quad (3)$$

Sijoittamalla edelliseen yhtälöön jännitteet ja kirjoittamalla jännitteiden vaihesiirtoero eli tehokulma  $\delta = \varphi_2 - \varphi_1$  yhtälö supistuu muotoon:

$$S = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta + j \frac{U_2}{X} (U_1 \cos \delta - U_2) \quad (4)$$

Yksinkertaistettuna voidaan esittää pätö- ja loistehon siirto seuraavilla yhtälöillä:

$$\text{Pätöteho:} \quad P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (5)$$

$$\text{Loisteho:} \quad Q = \frac{U_2}{X} (U_1 \cos \delta - U_2) \quad (6)$$

Koska tehokulma on yleensä pieni, voidaan likimääräisesti kirjoittaa seuraavasti:

$$\sin \delta \approx \delta \quad \text{sekä} \quad \cos \delta \approx 1$$

Jolloin edellisistä yhtälöistä voidaan kirjoittaa:

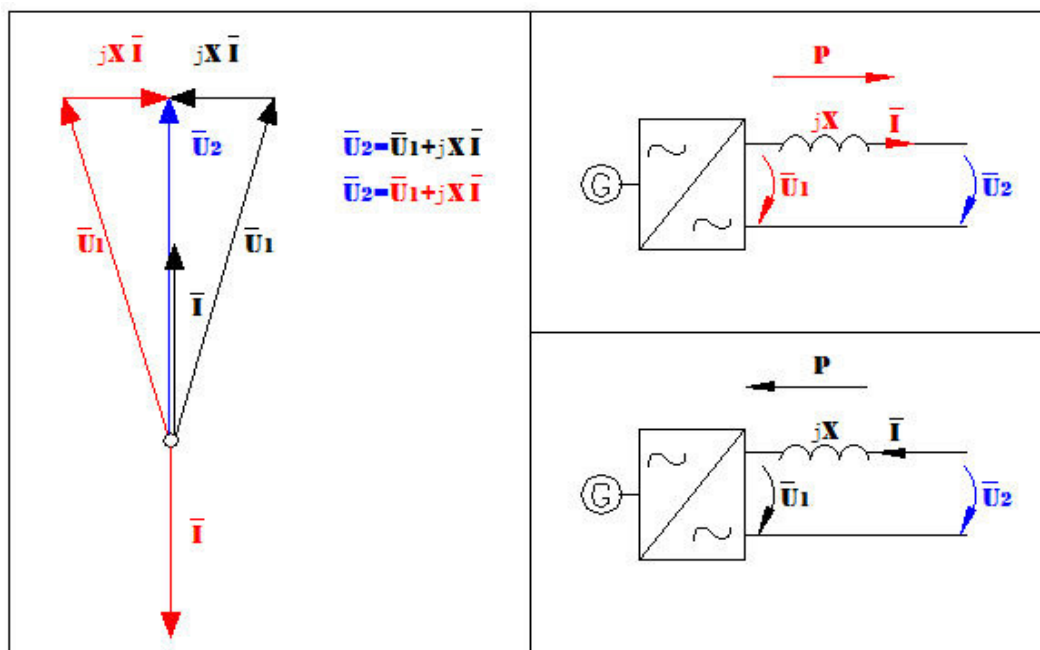
$$\delta \approx \frac{PX}{U_1 U_2} \quad (7)$$

$$(U_2 - U_1) \approx \frac{QX}{U_2} \quad (8)$$

Huomataan yhteys pätötehon ja tehokulman välillä, sekä yhteys loistehon ja jännite-eron välillä. /3/

Pätötehon säätö tapahtuu taajuusmuuttajan napajännitteen  $U_1$  ja verkon jännitteen  $U_2$  välistä vaihesiirtoa (tehokulma  $\delta$ ) säätämällä. Samalla voidaan säätää pätövirran suuntaa, joko  $0^\circ$  tai  $180^\circ$  (suhteessa  $U_2$  :een) eli muutetaan pätötehon  $\cos \varphi$ -merkkiä (tehokerroin) positiiviseksi tai negatiiviseksi. Kuvassa 8 on esitetty osoittimilla ja periaatepiirroksilla pätötehon liikkuminen molempiin suuntiin kuristimen läpi. Punaiset osoittimet kuvaavat tilannetta, jossa pätötehon suunta on taajuusmuuttajasta verkkoon päin eli pätövirta on  $180^\circ$  edellä verkon jännitettä  $U_2$ .

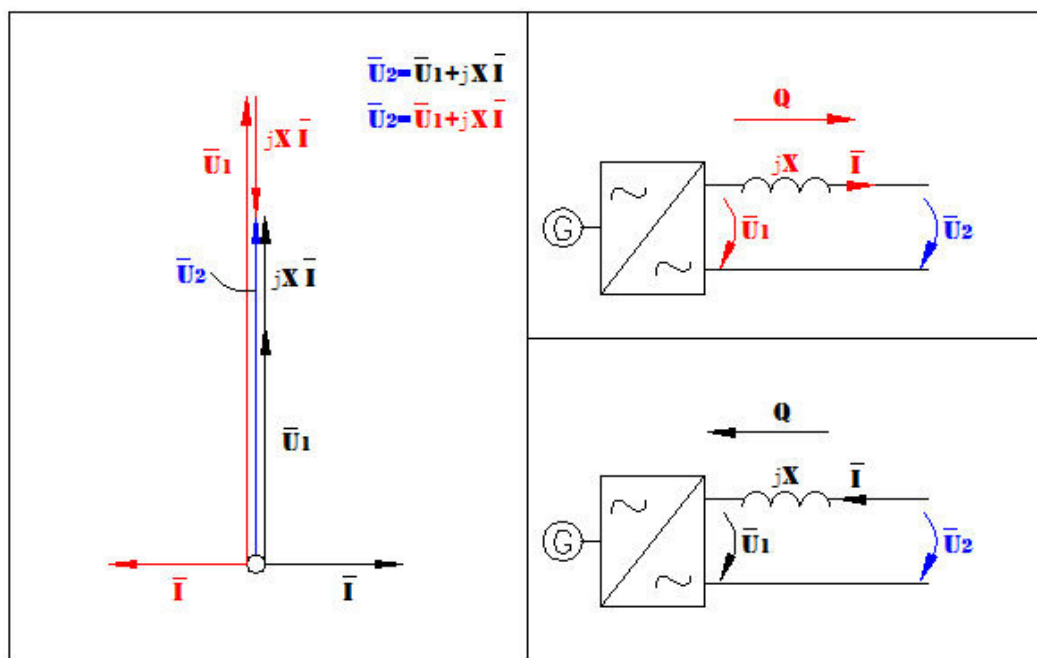
Mustat osoittimet kuvaavat tilannetta, jossa pätöteho siirtyy verkosta taajuusmuuttajaan eli pätövirta ja verkon jännite  $U_2$  ovat samanvaiheisia. Sinisellä esitetty jännite  $U_2$  kuvaa verkon jännitettä, joka pysyy molemmissa tapauksissa vakiona. /5/



**Kuva 8.** Pätötehon säätö yleisesti /5/

Loistehon säätö tapahtuu taajuusmuuttajan napajännitteen  $U_1$  amplitudia eli suuruutta säätämällä. Kuvassa 9 on esitetty osoittimilla ja periaatepiirroksilla loistehon liikkuminen molempiin suuntiin kuristimen läpi. Molemmissa tapauksissa jännitteet ovat samanvaiheisia. Punaiset osoittimet kuvaavat tilannetta, jossa  $U_1$  on suurempi kuin  $U_2$  eli virta on edellä jännitettä  $U_1$  ja induktiivisen loistehon suunta on taajuusmuuttajasta verkkoon päin. Mustat osoittimet esittävät tilannetta, jossa  $U_1$  on pienempi kuin  $U_2$  eli jännite  $U_1$  on edellä virtaa ja induktiivisen loistehon suunta on verkosta taajuusmuuttajaan päin. Sinisellä esitetty jännite  $U_2$  on verkon jännite ja se pysyy molemmissa tapauksissa vakiona. /5/



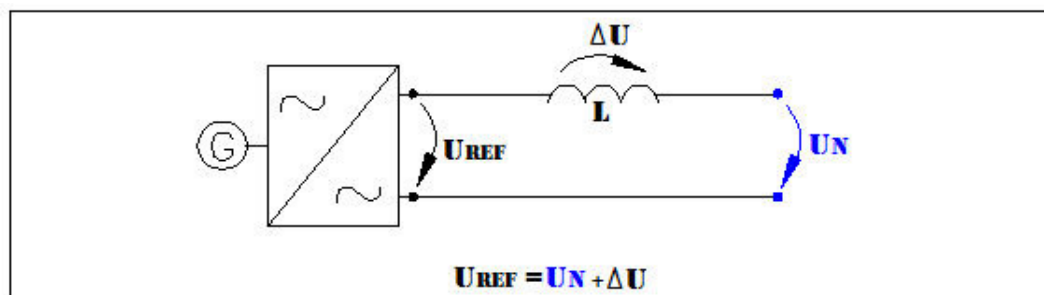


**Kuva 9.** Loistehon säätö yleisesti /5/

Kuvista 8 ja 9 huomataan, että pätötehon siirtämisen edellytyksenä on, että jännitteet  $U_2$  ja  $U_1$  ovat erivaiheisia (tehokulma  $0^\circ < \delta < 180^\circ$ ). Jos jännitteiden vaihesiirtokulmien erotus on 0 (tehokulma  $\delta = 0^\circ$ ) siirretään pelkästään induktiivista loistehoa. /5/

## 5.2 Jännitehäviön kompensointi (Open-Loop)

LCL-suodatin ja muuntaja aiheuttavat jännitehäviöitä Grid Converterin lähtöjännitteeseen. Jännitehäviöt täytyy määrittää laskemalla ja kompensoida jänniteohjetta  $U_{ref}$  suuremmaksi niin, että todellinen lähtöjännite  $U_N$  saadaan halutulle tasolle jännitehäviö  $\Delta U$  huomioon ottaen.



**Kuva 10.** Jännitehäviön kompensointi

Häviöiden laskentaan Grid Converter käyttää parametreja **Inductor Size** ja **Inductor Losses**. **Inductor Size** ( $X_k\%$ ) tarkoittaa reaktanssin aiheuttaman jännitehäviön prosenttiosuutta. **Inductor Losses** on prosenttiarvo, jolla määritetään resistanssin osuus prosentteina reaktanssista ( $R_k\% = \text{Inductor Losses} * X_k\%$ ). Laskenta perustuu seuraavaan kaavaan. /12/

$$\Delta U = R_K * I_P + X_K * I_Q$$

Kaavaa ei voida kuitenkaan suoraan käyttää, koska parametrit ovat prosenttimuodossa.  $I_{p\%}$  ja  $I_{q\%}$  ovat pätö- ja loisvirran prosenttiosuudet virtaparametrasta **System Rated Current**. Edellä saadut arvot, loiskomponentti  $X_{k\%}$  ja  $I_{q\%}$  sekä pätökomponentti  $R_{k\%}$  ja  $I_{p\%}$ , muodostavat kokonaisjännitehäviön, joka suhteutetaan pääjännitteeseen  $U_N$ .

$$\Delta U = (R_{K\%} * I_{P\%} + X_{K\%} * I_{Q\%}) * U_N$$

Lisäämällä saatu jännitehäviö  $\Delta U$  haluttuun jännitteeseen  $U_N$ , saadaan jänniteohje  $U_{ref}$ .

$$U_{ref} = U_N + \Delta U$$

Seuraava esimerkki on LCL- suodattimen aiheuttaman jännitehäviön laskenta.

System Voltage	440 Vac	440 Vac	P:Supply Voltage
System S [kVA]	783,0 kVA		
System Cos Phi	0,80		
System total current	1780 A		
SIN Phi	0,60		
Power P [kW]	626,4 kW		
Reactive Q [kVar]	469,8 kVar		
Reactive current [A]	1068 A		
Active Current [A]	1424 A		
LCL Rated Current	2061 A	2061 A	P:SystemRatedCurrent
LCL Reactive Voltage losses	16,0 %	16,0 %	P:Inductor Size
LCL Active Voltage losses	3,0 %	18,8 %	P:Inductor Losses
Reactive losses	36,47 Vac		
Active losses	9,12 Vac		
Constant Voltage losses	0,00 Vac		
Total Voltage loss	45,59 Vac		
U3 (Drive terminal voltage)	485,6 Vac		
Needed DC Voltage	721 Vdc		

**Kuva 11.** Jännitehäviön kompensointilaskelma /12/

$$\text{InductorSize} = X_{k\%} = 16\% = 0,16$$

$$\text{InductorLosses} = 18,8\% \rightarrow R_{k\%} = 0,188 * X_{k\%} = 0,188 * 0,16 = 0,03$$

$$I_{p\%} = \text{Pätövirran } \%- \text{ osuus LCL:n virrasta} = \frac{1424 \text{ A}}{2061 \text{ A}} = 0,691$$

$$I_{q\%} = \text{Loisvirran } \%- \text{ osuus LCL:n virrasta} = \frac{1068 \text{ A}}{2061 \text{ A}} = 0,518$$

$$U_N = \text{Pääjännite} = 440 \text{ V}$$

$$\text{LCL-suodattimen jännitehäviö} = \Delta U = (R_{K\%} * I_{P\%} + X_{K\%} * I_{Q\%}) * U_N$$

$$\Delta U = (0,03 * 0,691 + 0,16 * 0,518) * 440 \text{ V} = 45,6 \text{ V}$$

$$\text{Jänniteohje} = U_{ref} = U_N + \Delta U = 440 \text{ V} + 45,6 \text{ V} = 485,6 \text{ V}$$

Kompensointia käytetään tällaisenaan Island-moodissa ja Micro Grid -moodissa. Standard AFE -moodissa edellä mainituista parametreista käytetään vain **Inductor Size**-parametria, joka ilmaisee tässä tapauksessa jännitehäviön prosentteina nimellisjännitteestä 100 %:n pätövirralla. Lisäksi käytetään parametria **Capacitor Size**, jolla määritetään prosentteina LCL-suodattimen kondensaattoriin menevä loisvirta. Laite käyttää em. arvoja kompensointiin ja säätää sisäisesti **Reactive**

**Current Reference**-parametria. Jos molemmat arvot on asetettu oikein, saadaan verkon puolelle tehokerroin 1. /8/

Jännitehäviön kompensointi on tärkeä toimenpide, koska kompensoimaton järjestelmä voi aiheuttaa tarpeetonta loistehon siirtymistä (jännite-ero ~ loisteho), joka puolestaan voi johtaa verkon väärään jännitetasoon.

### 5.3 Standard AFE mode (Verkkokäyttö PTI)

Tässä moodissa välipiirin tasajännite pidetään vakiona. Laite käyttää lopullisena tasajänniteohjeenaan parametrien **Nominal DC Voltage** ja **DC Voltage Reference** tuloa, joka on nähtävissä valvontasignaalista **Final DC Voltage Ref**. Tasajänniteohje muodostetaan käyttäen parametria **DC Voltage Reference**, joka on prosenttiarvo parametrissa **System Nominal DC** tai jos **System Nominal DC** parametri on nolla, niin **Nominal DC Voltage** =  $1,35 * \text{Grid Nominal Voltage}$ .

Regeneratiivinen loisteho annetaan suoraan ohjeena **Reactive Current Reference**-parametrilla, joka on loisvirran prosenttiosuus virtaparametrissa **System Rated Current**, joka puolestaan on laitteen tai muuntajan ulostulovirta. Loisteho-ohjetta **Reactive Current Reference** voidaan käyttää tässä moodissa tehokertoimen säätöön ja kompensoimaan loistehoa. Negatiivisella arvolla saadaan kapasitiivista virtaa, joka kompensoi induktiivista loistehoa ja positiivisella arvolla induktiivista virtaa, joka puolestaan kompensoi kapasitiivista loistehoa.

Standard AFE -moodissa tehoa siirretään joko välipiiristä vaihtosuuntaajaan eli PTO, jolloin sähkökone toimii generaattorina ja välipiirin jännite pyrkii nousemaan tai välipiiristä sähkökoneelle eli PTI jolloin kone toimii moottorina ja välipiirin jännite pyrkii laskemaan. Tehoa kulutetaan tai tuotetaan ohjaamalla sähkökoneen taajuusmuuttajaa (INU) positiivisella tai negatiivisella momenttiohjeella (teho-ohje). Grid Converterissa Standard AFE -moodia käytetään yleensä PTI:ssä. Tällöin AFE-laitteen käyttö tasasuuntaajyksikkönä on perusteltua vain ns. low harmonic-käytössä eli vaatimuksena on matala virran kokonaissärö ( $\text{THDi} \leq 5\%$ ). /8/

#### 5.4 Island mode (Saarekekäyttö PTO)

Island-moodi tekee vakioverkon halutulla jännite- ja taajuusarvolla. Jännitteen nosto nimellistasolle tapahtuu aikaparametrissa **Voltage Rise Time** annetussa ajassa. Välipiirin tasajännite pidetään tässäkin moodissa vakiona. Moodi on tarkoitettu käytettäväksi silloin, kun taajuusmuuttaja on verkon ainoa tehonlähde. Taajuus annetaan parametrilla **Grid Nominal Frequency**, joka toimii myös taajuuden oletusarvona ja jännite parametrilla **Grid Nominal Voltage**. Tehoarvot annetaan parametreilla **System Rated kW** eli pätöteho, **System Rated kVA** eli näennäisteho ja **System Cos Phi** eli tehokerroin. Tehoa ei siis varsinaisesti säädetä. Toiminta perustuu siihen, että laite pyrkii pitämään sille asetellut arvot ja näissä rajoissa saareke ottaa tarvitsemansa pätö- ja loistehon. Island-moodia voi käyttää vain PTO:ssa. /8/

#### 5.5 Microgrid Mode (Saarekekäyttö PTO ja Verkkokäyttö PTO)

Micro Grid-moodi voidaan tahdistaa olemassa olevaan verkkoon OPT-D7:n avulla tai jos verkkoa ei havaita, se tekee verkon aikaparametrin **Voltage Rise Time** mukaisessa ajassa. Micro Grid -moodissa annetaan haluttu jännite ja taajuus parametreilla **Grid Nominal Voltage** ja **Grid Nominal Frequency**. Tehot annetaan parametreilla **System Rated kW** eli pätöteho, **System Rated kVA** eli näennäisteho ja **System Cos Phi** eli tehokerroin. Lisäksi Micro Grid -moodissa annetaan rinnakkaiskäytössä taajuuden ja jännitteen kuormitusjoustossa tarvittavia parametreja.

**Base Current Reference**-parametrilla määritetään poikkeama taajuusohjeelle taajuuden kuormitusjoustossa. Grid Converter käyttää **Grid Nominal Frequency**-parametria tässä myös taajuuden ohjearvona ja se toimii myös vertailupisteenä parametreille **Base Current Reference** ja **Frequency Droop**. **Frequency Droop**-parametrilla annetaan pätövirtaan verrannollinen taajuuden kuormitusjousto hertseinä ja **Voltage Droop**-parametrilla määritetään jännitteen kuormitusjousto prosenttiarvona 100 % loisivirralla. **Frequency Drooping Offset**-parametria käytetään taajuuden kuormitusjoustossa perustaajuuden (asetettu taajuus) säätöön.

Tässäkään moodissa ei varsinaisesti säädetä pätö- ja loistehoa vaan rinnakkaiskäytössä tehonhallintajärjestelmä säättää niiden tasapainoa muiden tehonlähteiden kanssa. Grid Converterissa moodia käytetään yleensä saarekekäytössä PTO:ssa tai verkkokäytössä PTO:ssa. Micro Grid -moodin kaksi toimintaperiaatetta ovat **Droop Speed Control** ja **Isochronous Speed Control**. Micro Grid-moodin toimintaa rinnakkaiskäytössä sekä em. periaatteita käsitellään seuraavissa kappaleissa. /8/

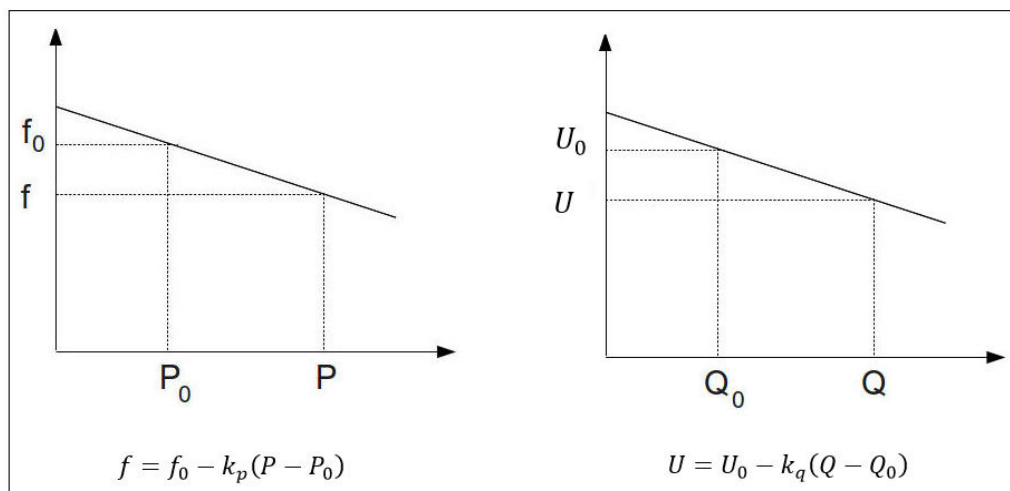
### 5.5.1 Toimintaperiaate: Droop Speed Control (Muuttuva taajuus)

Pätö- ja loistehokuorman tasaus ja ”jako” rinnakkaisten laitteiden kesken tapahtuu taajuuden ja jännitteen kuormitusjouston avulla. Se on alun perin tahtigeneraattoreiden nopeuden säätötapa, jossa taajuus joustaa pätötehokuormituksen mukaan ja jännite joustaa loistehokuormituksen mukaan.

Kuormitusjouston perustana on kohdassa 5.1 esitetty yleistys, että tehokulma  $\delta$  on yleensä pieni, jolloin

$$\delta \approx \frac{PX}{U_1 U_2} \quad \text{ja} \quad (U_2 - U_1) \approx \frac{QX}{U_2} \quad /3/$$

Kuormitusjousto on suhteellinen säätö, joka riippuu kuormituksesta. Kuvassa 12 on esitetty taajuuden- ja jännitteen kuormitusjouston periaate. Suhteen ilmaisee lineaarinen ensimmäisen asteen yhtälö, jossa kulmakerroin  $k_p$  on aseteltu kuormitusjoustoprosentti, taajuuden arvo  $f_0$  ns. peruskuormituksella  $P_0$  sekä kasvaneen pätötehokuorman takia pienentynyt taajuus  $f$ . Kuormitusjoustoprosentti ilmaisee kuinka paljon mitatun arvon pitää muuttua, jotta säädettävä arvo muuttuisi 100 %. Esimerkiksi jos taajuuden kuormitusjousto on 4 %, taajuuden 4 %:n muutos aiheuttaa pätötehossa 100 %:n muutoksen. Tai vastaavasti jos taajuus muuttuu 1 %:n pätöteho muuttuu 25 %. /3/



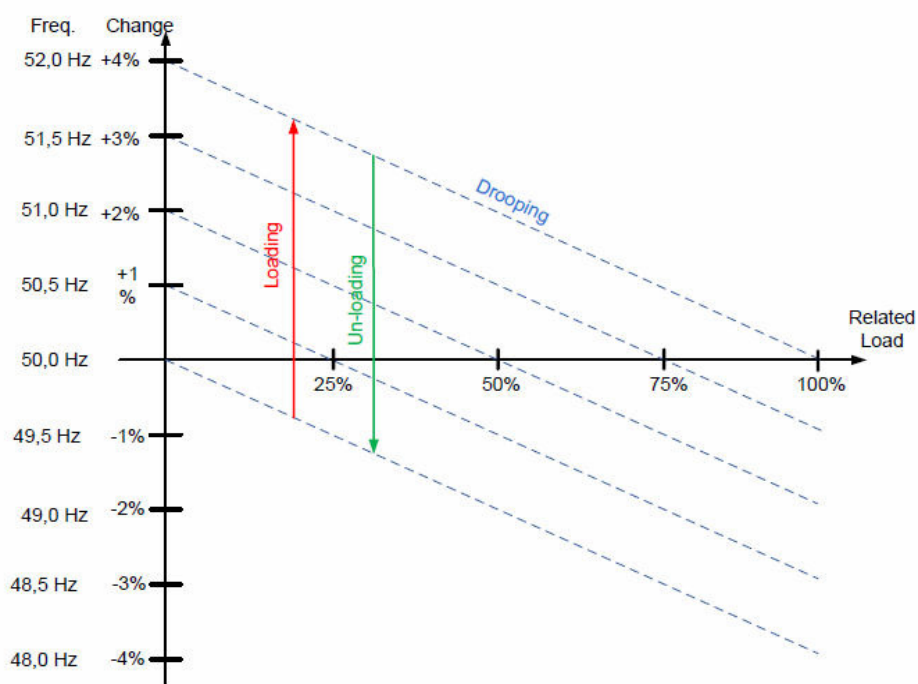
**Kuva 12.** Kuormitusjousto, periaatekuva /3/

Micro Grid-moodissa kuormitusjousto toimii niin, että kaikille saman verkon laitteille on annettu sama kuormitusjoustoprosentti suhteessa kuormitukseen, jonka avulla tehonhallintajärjestelmä säättää laitteita. Tehonhallintajärjestelmä ohjaa Grid Converteria **Base Current Reference-** ja **Reactive Current Reference-**parametreilla. **Base Current Reference-**parametrilla ohjataan taajuuden kuormitusjoustoa (mitataan taajuutta OPT-D7:n avulla). **Frequency Droop-**parametrilla annetaan pätevirtaan verrannollinen taajuuden kuormitusjousto hertseinä (2 Hz = 100 % pätevirta, 1 Hz = 50 % pätevirta jne.). **Voltage Droop-**parametrilla määritetään jännitteen kuormitusjousto prosenttiarvona suhteessa 100 % loisivirtaan (+2 %:n jännitteen muutos vastaa 100 %:sta kapasitiivista loisvirtaa ja -2 %:n muutos 100 % induktiivista loisvirtaa). Micro Grid-moodissa voidaan antaa **Reactive Current Reference-**parametrille esimerkiksi arvo 100 % (tai -100 %) jolloin jännite pienenee (tai nousee) 2 % eli sen verran, mitä **Voltage Droop-**parametrilla on aseteltu. **Frequency Drooping Offset-**parametria käytetään taajuuden kuormitusjoustossa perustaajuuden (asetettu taajuus) säätöön. Esimerkiksi jos on asetettu halutuksi taajuudeksi 50 Hz ja taajuuden kuormitusjousto on asetettu 2 Hz:iin, tämä parametri voidaan asettaa 1 Hz:iin, jolloin 50 %:n pätötehokuormalla taajuus pysyy nimellisessä arvossa (ilman tätä asetusta taajuus putoaisi 49 Hz:iin). /8/

Pätötehokuorman lisääntyminen verkossa saa taajuuden pienenemään, jolloin tehonhallintajärjestelmä antaa **Base Current Reference-**parametrille tarvittavan

arvon, jolla laite syöttää verkkoon oman ”osuutensa” lisääntyneestä pätöteho-kuormasta. Esimerkiksi jos taajuuden kuormitusjousto on asetettu 2 Hz:iin ja verkon taajuus on vakio 50 Hz (jäykkä tai muuttumaton verkko) saadaan **Base Current Reference**-parametrin avulla (annetaan arvoksi 100 %) taajuusmuuttaja syöttämään verkkoon 100 %:n pätöteho. /8/

Kuvassa 13 on esitetty taajuuden kuormitusjousto sekä tehonhallintajärjestelmän avulla toteutettu kuormitusjouston kompensointi, jossa 100 %:n pätöteho kuorman lisäys 50 Hz:n taajuusohjeella ensin pudottaa laitteen lähtötaajuutta 2 Hz eli 48 Hz:iin (alin katkoviiva 100 %:n kohdalla). Tämän jälkeen tehonohjausjärjestelmä nostaa laitteen taajuusohjetta eli antaa **Base Current Reference**-parametrille kuormaa vastaavan arvon 100 %, jotta verkon taajuus pysyisi nimellisenä eli 50 Hz:ssä (katkoviiva ”nostetaan” 100 %:n kohdalle x-akselille), jolloin laitteen uusi taajuusohje 100 % kuormalla on 52 Hz (katkoviivan kohta y-akselilla). Katkoviivan kulmakerroin on 0,04 eli 4 % ja taajuuden kuormitusjousto on tällöin 4 %. /8/

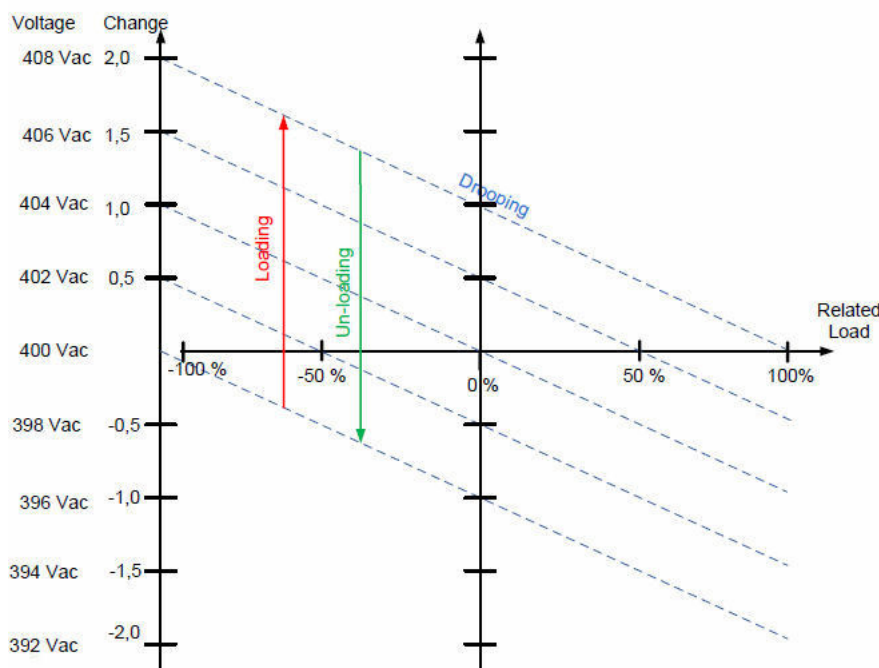


**Kuva 13.** Frequency drooping eli taajuuden kuormitusjousto /8/

Loistehokuormituksen tasapainotus ja kuorman jako rinnakkaisten laitteiden kesken tapahtuu jännitteen kuormitusjoustolla (engl. voltage drooping). Kuvassa 14



on esitetty jännitteen kuormitusjousto sekä tehonhallintajärjestelmään ohjelmoitu kuormitusjouston kompensointi. Kuvassa y-akseli erottaa kapasitiivisen kuorman vasemmalle ja induktiivisen kuorman oikealle puolelle. Esimerkiksi jos lisätään 100 % induktiivista kuormitusta jännitteen ohjearvon ollessa 400 V, taajuusmuuttajan lähtöjännite ”saa luvan” ensin pienentyä 8 voltia eli 2 % (alin katkoviiva 100 %:n kohdalla). Tämän jälkeen tehonhallintajärjestelmä antaa taajuusmuuttajalle **Reactive Current Reference**-parametrille arvon 100 %, joka nostaa jänniteohjetta (alin katkoviiva ”nostetaan” 100 %:n kohdalle x-akselille). Uusi jänniteohje 100 % induktiivisella kuormalla on 408 V (katkoviivan kohta vasemmanpuoleisella y-akselilla) ja lähtöjännite nousee 400 V:iin . Katkoviivan kulmakerroin on 0,02 eli 2 % ja jännitteen kuormitusjousto on tällöin 2 %. Toisena esimerkkinä 50 % :n lisäys kapasitiivista kuormaa vastaavasti ensin nostaa lähtöjännitteen 406 V:iin (ylin katkoviiva -50 %:n kohdalla x- akselilta). Tämän jälkeen tehonhallintajärjestelmä antaa taajuusmuuttajalle **Reactive Current Reference**-parametrille arvon -50 %, joka laskee jänniteohjeen 394 V:iin ja lähtöjännitteen 400 V:iin (katkoviiva ”lasketaan” -50 % kohdalle x-akselille ja katsotaan katkoviivan toisen pään kohta vas. y-akselilta). /8/



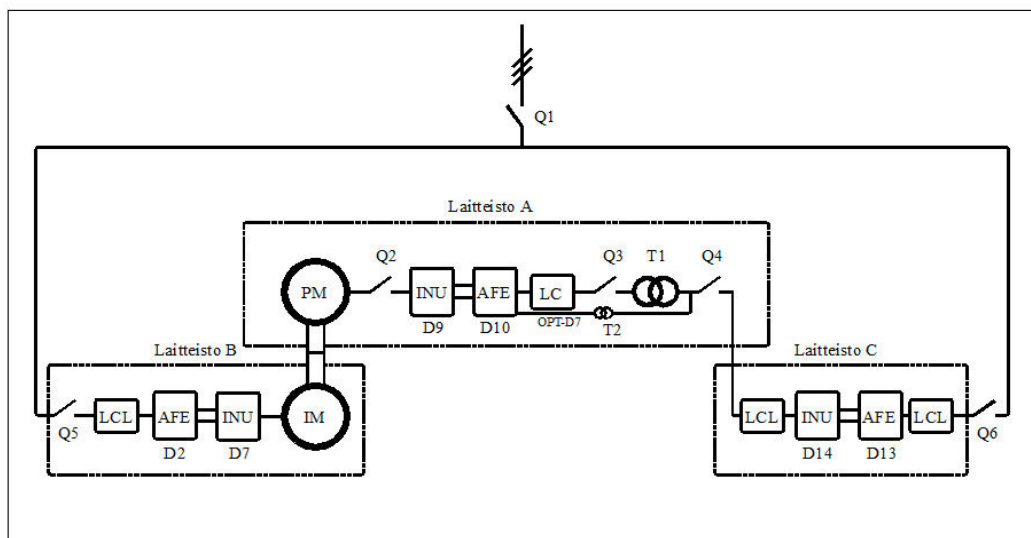
**Kuva 14.** Voltage drooping eli jännitteen kuormitusjousto /8/

### 5.5.2 Toimintaperiaate: Isochronous Speed Control (Vakio taajuus)

**Base Current Reference**-parametria voidaan käyttää yhdessä parametrin **Start Power Mode** kanssa, antamalla sille arvoksi **Isochron. Gen.** Tällä valinnalla taajuusmuuttaja käyttää keinoverkon taajuusohjeena optiokortilla OPT-D7 mitattua taajuutta. Tällöin taajuusmuuttajan verkosta ottama tai verkkoon syöttämä teho määritellään pelkästään parametrilla **Base Current Reference** eikä verkon taajuuden muuttuminen vaikuta tehonsyöttöön. Toisin sanoen teho pysyy teho-ohjeessa riippumatta taajuudesta. Tämä toimintatapa on tarkoitettu käytettäväksi rinnankäytössä esim. kahdessa rinnakkaisessa laitteessa, jotka syöttävät tehoa muuttumattomaan eli jäykkään verkkoon. /8/

## 6 LAITTEEN KOKOONPANO

Oheisessa kuvassa 15 on esitetty laitteen kokoonpano. Se koostuu kolmesta laitteistosta A, B ja C, jotka on rajattu toisistaan pistekatkoviivalla. Kaikki taajuusmuuttajat ovat Vacon NXP- mallisia. Taajuusmuuttajien kokoa ei ole tarkoitus tässä työssä määritellä.



**Kuva 15.** Laitteen kokoonpanokaavio

Laitteisto B sisältää oikosulkumoottorin (IM) voimakoneena, invertteriyksikön D7, AFE- yksikön D2 ja LCL-suodattimen. Invertteriyksikössä D7 ohjelmistona käytetään Vacon NXP Marine-sovellusta (APFIFF09) ja AFE-yksikössä D2 Vacon NXP AFE-sovellusta (ARFIFF02).

Laitteisto A sisältää kestopagneettikoneen (PM), jonka akseli on yhdistetty em. lohkon voimakoneen akseliin. Generaattorin perässä oleva invertteriyksikkö D9 on varustettu Vacon Generator-sovelluksella (ARFIFF30) ja sitä seuraavassa AFE-yksikössä D10 on Vacon NXP Grid Converter -ohjelmisto (ARFIFF03). AFE-yksikkö on varustettu optiokortilla OPT-D7. Lisäksi lohkoissa on LC-suodatin ja muuntajat T1 ja T2. Muuntaja T1 on tyypiltään Dyn11 eli muuntajan ensiöpuoli on kolmioon kytketty ja toisiopuoli tähteen kytketty. ja sen kelloluku on 11, joka tarkoittaa 30 asteen vaihesiirtoa eli toisio on 30 astetta edellä ensiötä.

Laitteisto C sisältää invertteriyksikön D14, AFE- yksikön D13 sekä kaksi LCL-suodatinta. Invertteriyksikkö on varustettu Vacon Grid Emulator-ohjelmistolla (ARFIF103). AFE-yksikössä käytetään Vacon Grid Converter -ohjelmistoa (ARFIF03).

## 7 LAITTEEN TOIMINTA

Laitteella on tarkoitus simuloida Vacon NXP Grid Converterin ja sen eri moodien käyttöä laivaolosuhteissa. Laitteisto B ohjaa voimakonetta, jolla simuloidaan laivan moottoria. Laitteisto A kuvaa laitteita jotka asennettaisiin laivaan akseligeneraattorijärjestelmäksi. Laitteisto C simuloi laivan sähköverkkoa.

Testaus kohdistuu laitteistoon A, jossa on akseligeneraattorijärjestelmä, joka koostuu generaattorista, generaattorin taajuusmuuttajasta ja verkkovaihtosuuntaajasta. Seuraavaksi käydään läpi muutamia käytännön asioita liittyen asetuksiin sekä kuinka muut laitteistot asetellaan testattaessa Grid Converterin kolmea toimintamoodia.

D9:n Generaattori- sovelluksessa on neljä asetusta: 0: Commissioning (käyttöönotto-asetus), käytetään käyttöönotto-tilanteissa esim. silloin kun tehdään ID- ajo, 1: PTO (momenttisäätö negatiivisella momenttiohjeella), tehoa syötetään laivan sähköverkkoon esim. merellä seilattaessa, 2: PTI Boost (momenttisäätö positiivisella momenttiohjeella), käynnissä olevalla sähkökoneella tehostetaan (moottorina) potkurin pyörimistä ja lisätään laivan nopeutta, 3: PTI 0-Speed (Nopeussäätö), ajetaan laivaa pelkän sähkökoneen voimalla halutulla nopeudella esim. konevian takia tai voidaan myös käyttää silloin kun liikutaan poikkeuksellisen hitaasti esim. laivan saapuessa satama-alueelle.

Kestomagneettikoneen yhteydessä on hyvä huomioida D9:ssä olevan Generaattori-sovelluksen suositukset kyseiselle moottorityypille. Jos PTO:n lisäksi tarvitaan myös PTI:tä, voidaan kestomagneettikonetta ohjata joko Normal Motor Control-moodissa tai AFE-moodissa. Jos tarvitaan sekä PTI boosting- että PTI take me harbour-toimintoja on suositeltavaa käyttää Normal Motor Control-moodia ja lisäksi Closed Loop-ohjausta (tarvitaan takometri), jolla saadaan hyvä vasteaika tehon tarpeen muuttuessa. Jos tarvitaan vain PTI boosting -toimintoa PTO:n lisäksi, voidaan käyttää AFE-moodia, jolloin laitteisto tulee kuitenkin varustaa sini-suodattimella.

## 7.1 Standard AFE mode

Moodia käytetään yleensä Grid Converterissa kun on tarve käyttää sähkökonetta moottorina eli käyttää PTI:tä. Laitteisto B ajaa voimakonetta (IM) nopeussäädössä teho/momenttirajoituksella. PTI:tä testattaessa käytetään D9:ssä joko valintaa 2: PTI Boost tai 3: PTI 0-Speed ja riippuen valinnasta konetta käytetään joko moottorina momenttisäädössä positiivisella momenttiohjeella tai nopeussäädössä. Lisäksi on hyvä muistaa edellisessä kappaleessa selvitettyt suositukset kestopäinnettikoneelle PTI:ssä. D10 on Standard AFE -moodissa. Laitteisto C:ssä D14 ja D13 ovat molemmat AFE-moodissa ja kytkin Q6 on kiinni.

## 7.2 Island mode

Moodia käytetään kun halutaan testata Grid Converteria saarekekäytössä PTO:ssa ja verkossa on vain yksi tehonlähde. PTI ei ole tässä moodissa mahdollinen. Laitteisto B ajaa voimakonetta nopeussäädössä teho/momenttirajoituksella. Laitteisto A:n generaattorin taajuusmuuttaja D9 on asetuksella 1: PTO (momenttisäätö negatiivisella momenttiohjeella) ja D10 on Island-moodissa. Laitteisto C:ssä D14 ja D13 ovat molemmat AFE-moodissa ja kytkin Q6 on kiinni.

## 7.3 Micro Grid mode

Tätä moodia käytetään yleensä kun halutaan testata saarekekäyttöä PTO:ssa (Island PTO) yhden tai useamman tehonlähteen kanssa tai vastaavasti verkkokäytössä PTO:ssa (Grid-connected PTO). Laitteisto B ajaa voimakonetta nopeussäädössä teho/momenttirajoituksella. Laitteisto A:ssa generaattorin taajuusmuuttajassa D9 on valittuna asetus 1: PTO (momenttisäätö negatiivisella momenttiohjeella) ja D10 on Micro Grid -moodissa. Laitteisto C on yleensä Island-moodissa ja kytkin Q6 on kiinni.

## 8 LAITTEEN SÄHKÖISET KYTKENNÄT

Laitteen sähköiset kytkennät on esitetty liitteessä 1. Kaikki liitteen kuvat on piirretty AutoCAD LT-2014-ohjelmalla, jossa on käytetty CAD-Expert Oy:n Piirikaaviomenu -sovellusmenua. Kuvissa on käytetty Vacon HW Engineering-librarin valmiita tyyppikuvia ja niiden kuvapohjia ja symboleita.

Lehdet on numeroitu yhdestä viiteen (Sheet 1-5) ja jokaisen lehden oikeassa alakulmassa on lehteä vastaava numero. Lehdellä 1 on yksiviivapiirros, joka on esitetty kohdassa 6 laitteen kokoonpanoa käsiteltäessä. Kuva on helppolukuinen ja siitä saa hyvin käsityksen kokonaisuudesta.

Lehdellä 2 on kolmivaihekytkentäkuva laitteistojen pääpiireistä ja verkkoliitännästä. Kuvassa on pyritty säilyttämään sama rakenne ja komponenttien asettelu kuin yksiviivapiirroksessa selvyyden ja helppolukuisuuden säilyttämiseksi. Lisänä edelliseen kuvaan myös laitteistojen latauspiirit on esitetty tässä kuvassa. Laitteistojen A ja B välinen akseleiden yhdistäminen on kuvattu kaltevalla täyttökuviolla.

Jokainen laitteisto (B, A ja C) esitetään vielä yksitellen omilla lehdillään. Kuvat ovat aiempia kuvia vastaavassa järjestyksessä. Kuviin on lisäksi merkitty teksteillä ja nuolilla muiden laitteistojen sijainti. Lehdellä 3 on laitteisto B eli voimakonelaitteisto. Lehdellä 4 on laitteisto A, johon varsinainen testaus kohdistuu. Muuntaja T1:n toisiopuoli on kytketty tähteen, jolloin tähtipistettä käytetään nollajohtimena (N), joka mahdollistaa myös yksivaihekuormat. Muuntaja T2 on OPT-D7 kortin jännitteen mittausta varten. Lehdellä 5 on laitteisto C, joka kuvaa laivan sähköverkkoa.

## 9 YHTEENVETO

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa koulutuskäyttöön soveltuva akseligeneraattorilaitteisto perustuen Vacon NXP Grid Converter -tuotteeseen. Tavoitetta muutettiin hieman käytännön syistä (laajuus/aika) ja tehtäväksi jäi demolaitteen suunnittelu sekä laitteiston toiminnan ja teorian selvittäminen.

Aihe oli erittäin mielenkiintoinen ja ajankohtainen, koska esimerkkiratkaisua voi soveltaa laaja-alaisesti myös hajautetussa energiantuotannossa eikä käyttö rajoitu pelkästään laiva-/varustamo-käyttöön. Haasteina voisi mainita dokumentoidun teknisen tiedon saatavuuden, koska kyseessä on suhteellisen uusi sovellus. Lisäksi suurin osa laitteen tekniseen sisältöön liittyvästä materiaalista oli englannin kielellä ja oli haasteellista löytää termeille ja nimityksille suomenkielisiä vastineita. Joidakin termejä ei ole saatavilla suomeksi ja paras tapa olikin ilmaista termi englanniksi ja kuvailla sen sisältö suomeksi.

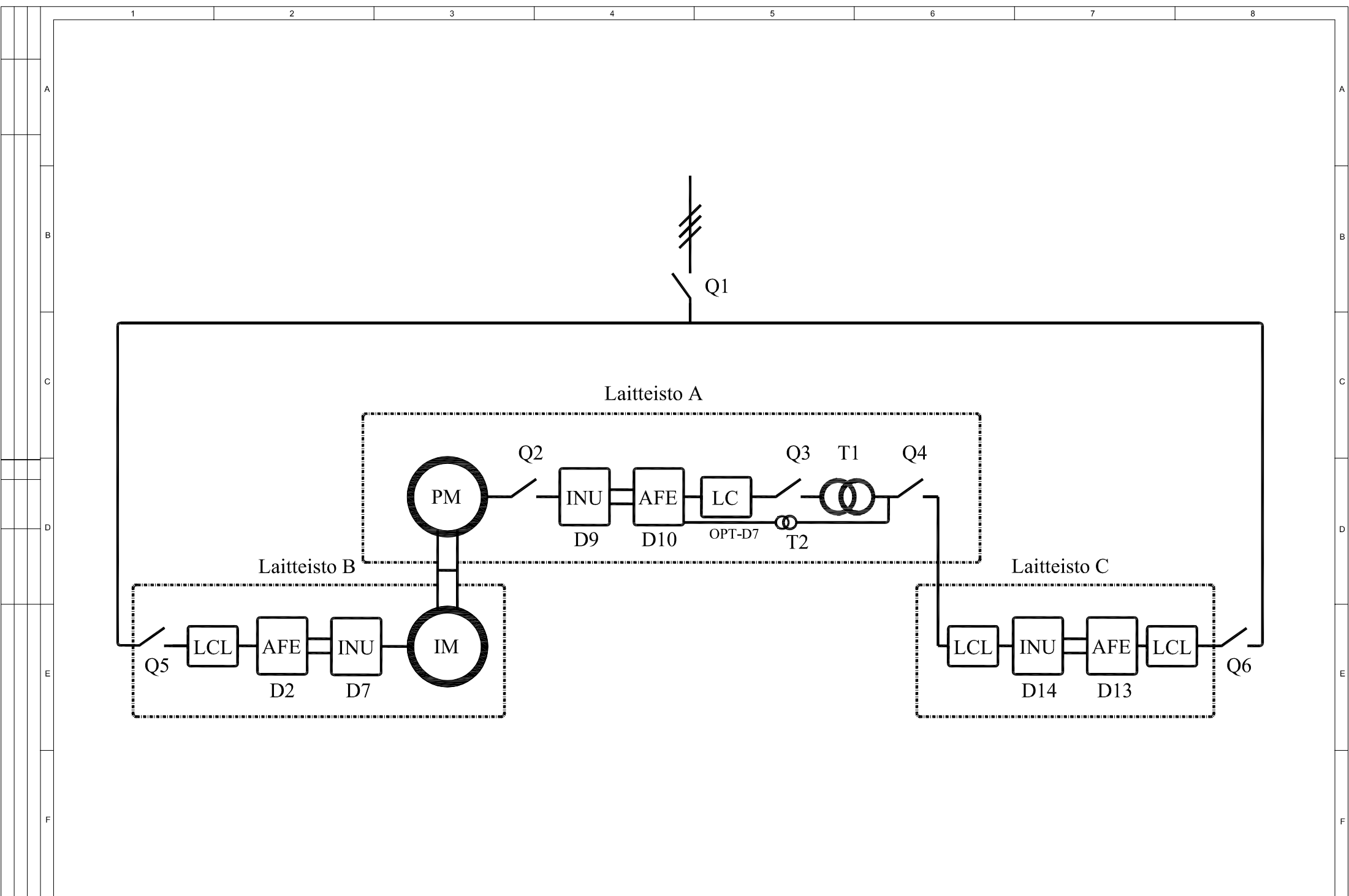
Suunnittelussa oli suuresti apua sovellustiimin osaamisesta ja kokemuksesta vastaavan laitteen käytöstä. Sähköpiirustusten tekemisessä auttoi se, että kuvapohjat, piirrosmerkit ja taajuusmuuttajien kytkennät olivat valmiina Vaconin omissa HW Engineering Libraryn tyyppikuvissa. Lähes kaiken tarvittavan saikin niistä kuvista muokkaamalla. Muutamia kontaktorin ja muuntajan piirrosmerkit sain käyttämästäni Piirikaaviomenu- sovellusmenusta. Piirrosmerkkejä muokkaamalla sai suhteellisen vaivattomasti luotua kaikki kokonaisuuteen tarvittavat elementit.

Laitteiston toteutuksessa tulisi ottaa huomioon eri sähkökonetyypit ja sisällyttää rakennettavaan laitteistoon kestoplaneettakoneen lisäksi myös oikosulku- ja tahitikonet ja mahdollistaa niiden helppo ja nopea vaihtaminen testattavan järjestelmän mukaan. Lisäksi laitteiston käyttöön tulisi sisällyttää erityyppisiä moottorienkoodereita (takometreja) sekä suodattimia, jotka myöskin lisäisivät laitteiston monipuolisuutta ja mahdollistaisivat testaamisen molempiin tehon suuntiin PTI ja PTO. Oppinnäytetyö voi toimia perehdyttävänä pohjatietona tekniikkaan tutustuttaessa ja ohjeena laitteiston toteutuksessa.



## LÄHTEET

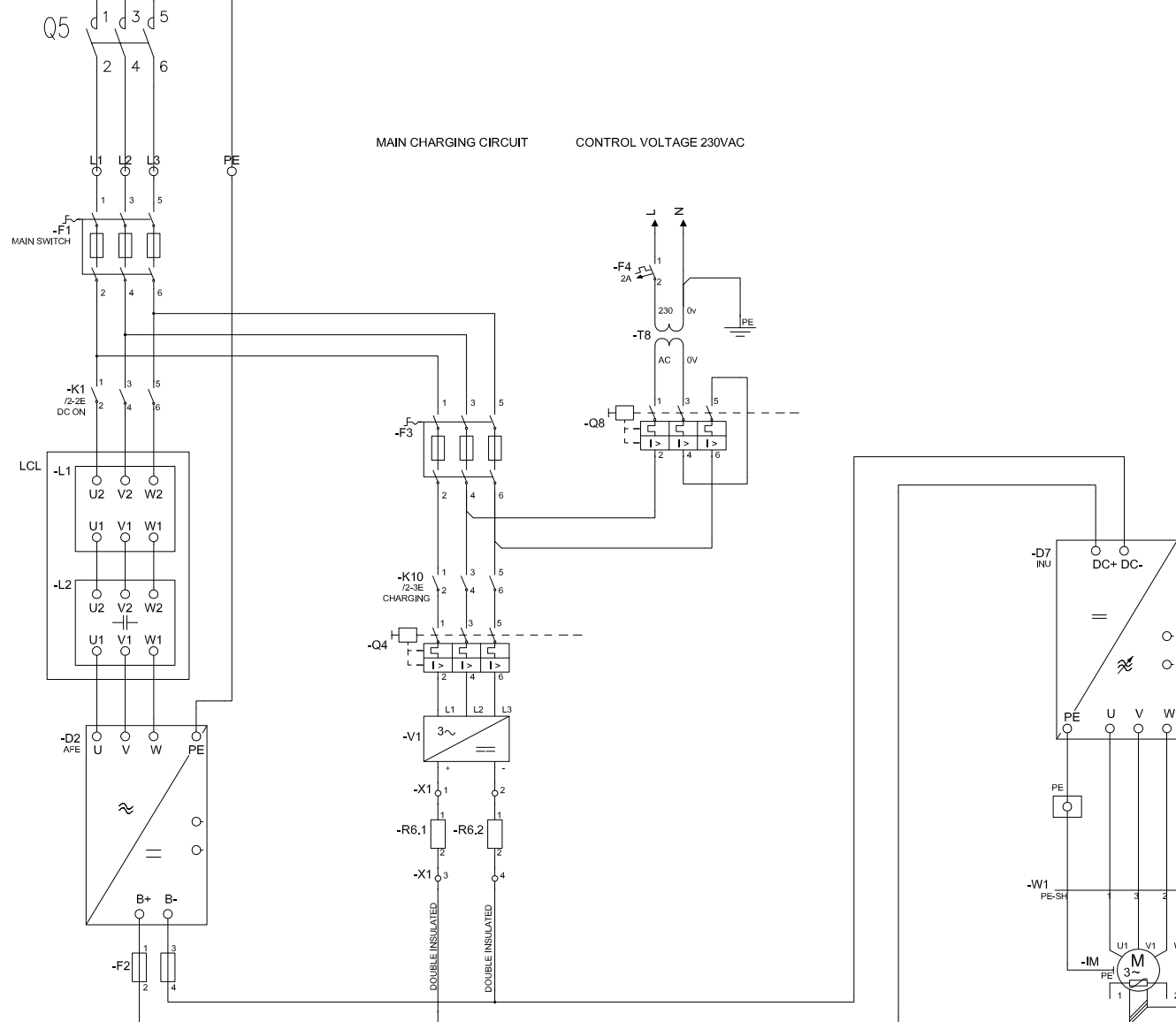
- /1/ AC Power Transmission. Open Electrical. Viitattu 7.12.2014  
[http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=AC\\_Power\\_Transmission#Lossless\\_Line\\_28Classical\\_Approach.29](http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=AC_Power_Transmission#Lossless_Line_28Classical_Approach.29)
- /2/ Chowdhury, S., Chowdhury, S.P. & Crossley, P. 2009. Microgrids and Active Distribution Networks. Viitattu 17.9.2014
- /3/ Droop Control. Open Electrical. Viitattu 7.12.2014  
[http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Droop\\_Control](http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Droop_Control)
- /4/ Hämäläinen, T. 2010. Vaihtosähkösuodatus invertterin lähdössä. Viitattu 26.9.2014  
[http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12802/Hamalainen\\_Toni.pdf?sequence=1](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12802/Hamalainen_Toni.pdf?sequence=1)
- /5/ Jokinen, K. Säädetty Sähkökäytöt tuntimuistiinpanot. Viitattu 25.9.2014
- /6/ Tampereen teknillinen yliopisto. Pyörivät sähkökoneet. Viitattu 4.9.2014  
[https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-11110/2013/Pyorivat\\_sahkokoneet.pdf](https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/DEE-11110/2013/Pyorivat_sahkokoneet.pdf)
- /7/ Vacon Drives Knowledge. Front-ends, harmonics, EMC and network. Viitattu 4.9.2014
- /8/ Vacon NXP AC Drives Grid Converter application manual. ARFIF03 Viitattu 2.10.2014
- /9/ Vacon NXP Grid Converter Finnish Brochure. Viitattu 26.11.2014  
[http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id\\_6222/cf\\_2/vacon-nxp-grid-converter-brochure-DPD01404A-finnis.PDF?635278128799700000](http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id_6222/cf_2/vacon-nxp-grid-converter-brochure-DPD01404A-finnis.PDF?635278128799700000)
- /10/ Vacon Oyj:n kotisivut. Historia. Viitattu 27.9.2014.  
<http://www.vacon.com/fi-FI/Vacon/yritys/vacon-historia/>
- /11/ Vacon Oyj:n kotisivut. Vacon sijoituskohteena. Viitattu 18.9.2014  
<http://www.vacon.com/fi-FI/Sijoittajat/Vacon-sijoituskohteena/>
- /12/ Vacon Oyj. Sisäinen dokumentti OH00091 V013 ARFIF03 Grid Converter. Viitattu 6.11.2014
- /13/ VTT Tutkimusraportti VTT-R-03623-09: Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä. Viitattu 24.9.2014  
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>





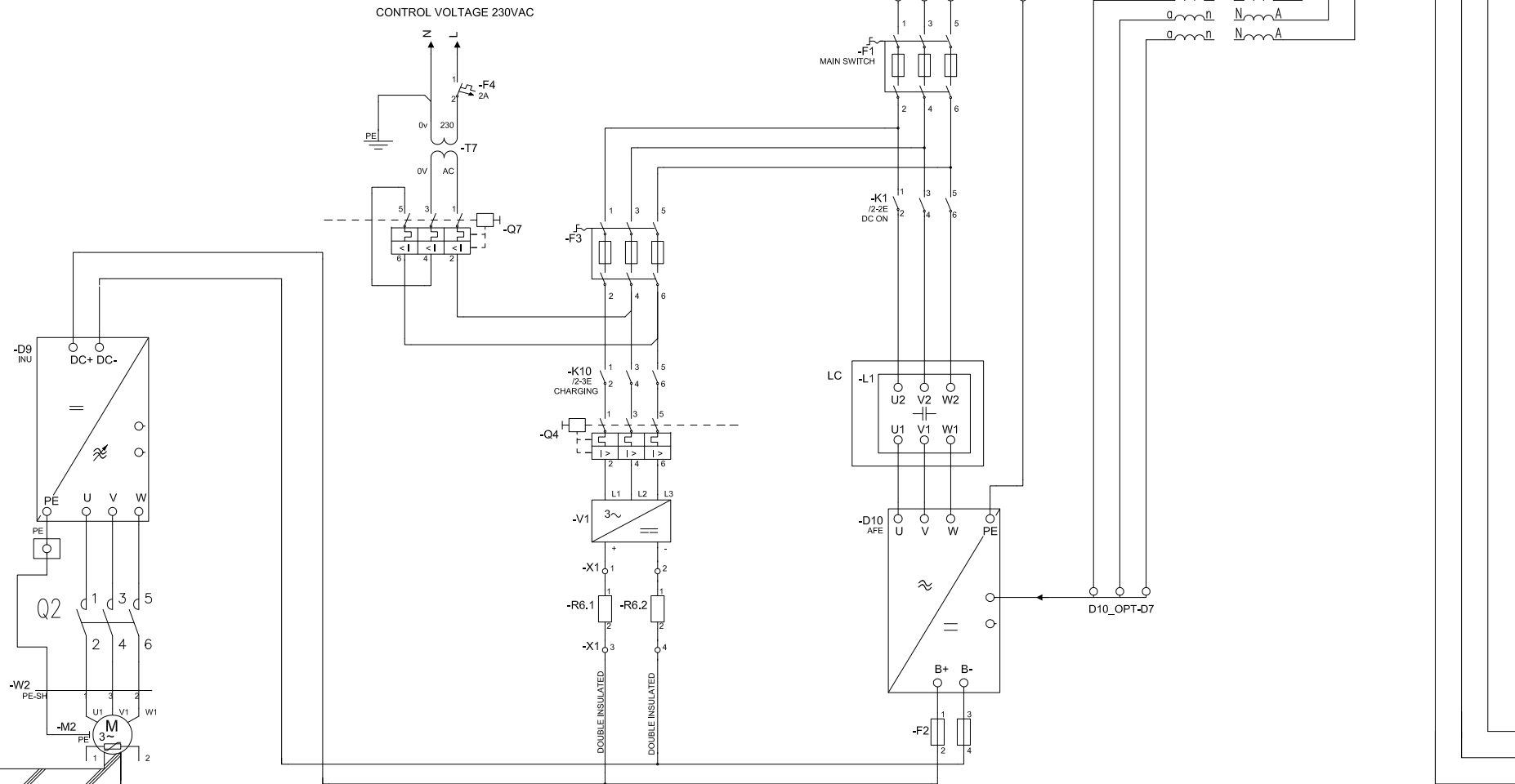
Q1:Ile

# Laitteisto B



Laitteistolle A

# Laitteisto A



Laitteistolta B

Laitteisto C

**vacon**

Project Vacon NXP Grid Converter Demo  
Customer  
Cust. ref.

Title  
Circuit diagram

Prepared S. Aflecht 16.12.2014  
Checked S. Aflecht 16.12.2014

Vacon Oyj

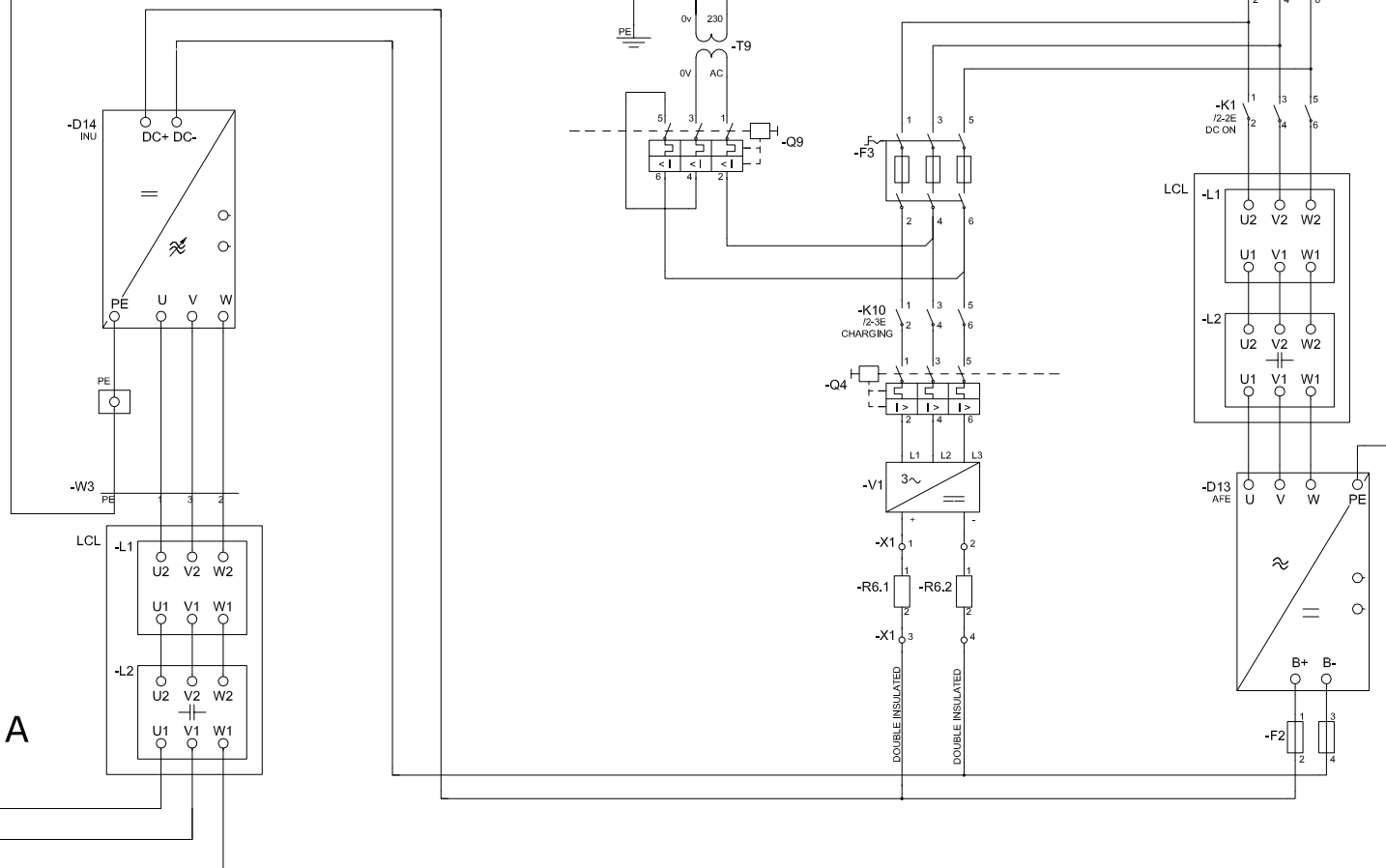
DCC  
Based on  
Proj. no Doc. no Revision  
Laitteisto A

Object = 01  
Loc. + 01  
Sheet 4  
Cont.

# Laitteisto C

Q1:Ile

CONTROL VOLTAGE 230VAC



Laitteistolta A

**vacon**

Project Vacon NXP Grid Converter Demo  
Customer  
Cust. ref.

Title  
Circuit diagram

Prepared S. Aflecht 16.12.2014  
Checked S. Aflecht 16.12.2014

Vacon Oyj

DCC  
Based on  
Proj. no Doc. no Revision  
Laitteisto C

Object = 01  
Loc. + 01  
Sheet 5  
Cont.